



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

***Estudio de la extrapolación de
resultados de relajación isoterma
a 1000 horas a partir de ensayos
realizados durante 240 horas
sobre armaduras activas de
acero de pretensar***

Trabajo realizado por:

Sara Cristina Quintanilla Fernández

Dirigido:

Borja Arroyo Martínez

José Alberto Álvarez Laso

Titulación:

***Máster Universitario en Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos***

Santander, 13 de diciembre de 2018

TRABAJO FINAL DE MASTER





ÍNDICE

1. Introducción, motivación y objetivos.	6
2. Ensayos de relajación de elementos activos y pasivos. Marco normativo.	12
2.1 Características mecánicas y comportamiento de las armaduras activas a relajación.	13
2.2 Descripción del ensayo isotérmico de relajación de tensiones.	18
2.3 Procedimiento del ensayo isotérmico de relajación de tensiones.	21
3. Materiales y metodología.	28
3.1 Agrupaciones de los materiales según la instrucción UNE 36094-1997.	28
3.2 Metodología	33
4. Resultados experimentales y análisis	38
4.1 Resultados de los alambres lisos	39
4.1.1 Alambres lisos de diámetro 4-6 milímetros.	39
4.1.2 Alambres lisos de diámetro de 7 a 9,5 milímetros.	42
4.2 Resultados de los alambres grafilados	48
4.2.1 Alambres grafilados de diámetro 4 a 6 milímetros.	48
4.2.2 Alambres grafilados de diámetro 7 a 9,5 milímetros.	50
4.3 Resultados de los cordones	57
4.3.2 Cordones formados por 7 alambres de entre 12,5 y 13 milímetros de diámetro.	58
4.3.1 Cordones formados por 7 alambres de entre 15 y 16 milímetros de diámetro.	65
4.4 Análisis de resultados	82
4.4.1. Alambres lisos	83
4.4.1. Alambres grafilados	84
4.4.3. Cordones de siete alambres	86
5. Conclusiones y trabajo futuro	88
5.1 Conclusiones	88
5.2 Trabajo futuro	90
6. Bibliografía.	92





1. Introducción, motivación y objetivos.

La determinación de las propiedades de los materiales que son empleados, como fin último, en la construcción de grandes obras de ingeniería civil, como pueden ser puentes o cualquier tipo de estructuras de hormigón armado no son para nada una cuestión trivial.

Todos los materiales empleados en obra deben ser testados para asegurar unas garantías mínimas durante su vida en servicio, además de cumplir con la normativa vigente.

Las construcciones de hormigón armado, por un lado, tienen el hormigón, el cual es sometido a control de calidad mediante probetas obtenidas en paralelo a su puesta en obra, con lo que se evalúa el material tal y como está siendo usado. Los elementos constituyentes de las armaduras, pre o post-tensadas, corren una suerte un poco distinta. En estos elementos, generalmente lo que se lleva a cabo es una homologación del producto por el fabricante suministrador previo a su puesta en el mercado, así como un control de calidad de este de forma periódica para re-evaluar el proceso de fabricación, de modo que se asegure que la calidad del producto a suministrar en obra no mantenga su calidad a lo largo del tiempo.



En el presente documento se abordan estos ensayos de caracterización a los que se someten las armaduras activas para construcciones civiles, más concretamente en lo referente a aquellos ensayos destinados su evaluación frente a fenómenos de relajación, es decir de pérdida de carga al someterlos a un alargamiento concreto según el paso del tiempo. Este parámetro es fundamental, pues la fiabilidad de una estructura de hormigón armado radica precisamente en la capacidad resistente que aportan las armaduras tras tensarse, la cual no puede verse perjudicada más allá de unos límites con el paso del tiempo.

“Grosso modo” estos ensayos mecánicos consisten en someter el elemento en cuestión a un alargamiento concreto y observar como decrece la carga durante un cierto periodo de tiempo respecto al valor inicial (grado de relajación); como es evidente, estos ensayos demandan cierta cantidad de tiempo. Tal como se expone más adelante en el documento, la normativa establece unos intervalos prefijados en función de las diversas exigencias, siendo habituales 240 horas y 1000 horas. Asimismo, con el objeto de reducir los tiempos y costes de ensayo, para el periodo largo (1000h) la normativa permite la extrapolación de la curva de comportamiento desde un ensayo real llevado a cabo a 240 horas, técnica que, salvo exigencia en contrario, es bastante habitual que sea adoptada por las empresas en sus programas de control de calidad. Evidentemente, esta técnica, como todas las simplificadas en diversos ámbitos de la ingeniería, puede adolecer de sus hándicaps y/o restricciones y proporcionar un valor que difiera del obtenido si se hubiera mantenido el ensayo real durante las 1000 horas.

Con el desarrollo del presente documento, se pretende realizar una evaluación directa de los resultados obtenidos en diferentes cordones y alambres para valorar la bondad de la técnica. Estos elementos serán agrupados en función de sus características geométricas y físicas (diámetros, tipos de cable, tipo de cordón ...), respondiendo a su vez, ante una necesidad industrial, para evaluar los resultados de forma racionalizada y conjunta. Es importante describir con mayor precisión dicha necesidad industrial y por lo tanto debemos detallar la importancia del sector industrial.



Es necesario mencionar que, en los países desarrollados, tal y como ocurre en España, las empresas y, por consiguiente, el sector ligado a los servicios industriales, que es el que contiene la mayor parte de la población activa trabajando en él y, por lo tanto, podemos llegar a afirmar que dicho sector, es el que sostiene la economía de nuestro país, de ahí el propósito o la intención, tal y como se expuso en el párrafo anterior, de realizar este tipo de ensayos, de una manera óptima o semejante.

Con esto, se pretende ligar la importancia que tienen las necesidades industriales, tales como la realización de este tipo de ensayos, con la productividad del país y en última instancia, con el continuo desarrollo de este.

Se tiene que encontrar la manera de realizar, en la medida de lo posible, un desarrollo industrial sostenible, que nos permita solventar la problemática medioambiental, generada a lo largo de los años, tras la realización de todos los procesos industriales.

Para ello, se debe y, por lo tanto, debemos de ser capaces de satisfacer las necesidades de las generaciones actuales, sin comprometer las necesidades tanto económicas como ambientales y sociales, de las generaciones futuras. Se busca conservar los recursos naturales de manera que se permita poder realizar un crecimiento económico en un mundo absolutamente globalizado.

Por otro lado, es necesario mencionar los efectos o impactos medioambientales que aparecen tras la realización de este tipo de ensayos, dentro de los cuales, el más destacado es el cambio climático. Dicho impacto ambiental, puede degenerar en consecuencias devastadoras por lo que debemos de reducir, en la medida de lo posible, tanto las emisiones de gases de efecto invernadero, como la sólida y ligada dependencia, que tenemos de los combustibles fósiles.

Es tal la problemática ambiental que tenemos en nuestro país, que España, junto con otros cinco países de la Unión Europea, generan el 70% de todos los gases de efecto invernadero de nuestro continente. [1]



A esto se debe de añadir, por su vinculación indirecta con la realización de estos ensayos, que la última reforma realizada sobre el sector eléctrico, imposibilita el desarrollo de las energías renovables, potenciando las energías sucias, tales como el “fracking” (extracción directa de gas mediante técnicas de fracturación del suelo) o la extracción de petróleo, por lo que con dichas técnicas, no contribuimos a la conservación de los recursos naturales, sino más bien, a su desaparición ya que ambos procesos son altamente contaminantes.

En lo referente a los ensayos isotérmicos de relajación de tensiones, nos centraremos en las armaduras activas, cuyos datos, serán extraídos y recogidos en el capítulo 3 del documento, mientras que dicho ensayo, será definido detalladamente en el siguiente capítulo, para poder comprender con mayor exactitud su funcionamiento.

Tal y como quedó expuesto al comienzo del desarrollo del documento, dichos ensayos someten al elemento, en este caso se trata de alambres o cordones, a una relajación durante un tiempo y posteriormente se ve como decrece la carga durante dicho intervalo.

Como estos ensayos requieren largos periodos de tiempo, la normativa permite realizar una extrapolación, de esta forma se consigue reducir tanto el tiempo del ensayo como sus costes. Se podrá realizar una comparativa entre la extrapolación permitida por la normativa y el valor real de la curva de relajación si se hubiese realizado hasta las 1000 horas.

Con dicha comparativa se pretende conseguir el grado de estimación de estimación, por lo que la idea fundamental de la realización de este documento, es las de obtener el grado de estimación que se produce en estos ensayos, en las diferentes muestras aportadas por el departamento de LADIM, ubicado en la escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander, para de esta forma, poder determinar principalmente su precisión, esa idea aparece ya que la obtención de los resultados se ejecuta hasta las 240 primeras horas porque la normativa permite aplicar una ecuación hasta ese instante y posteriormente, estimar el resto de los datos hasta alcanzar las 1000 horas.



Gran parte de las empresas que solicitan este tipo de ensayos, se aprovechan de que la normativa les permita estimar el resultado para 1000 horas y extrapolar el valor, ya que así, se ahorran mucho tiempo y, además, desde el punto de vista económico, es mucho más rentable.

Para poder determinar el grado de estimación de dicha extrapolación, voy a comprobar los informes de resultados proporcionados, agrupándoles según sus características geométricas y los cuales han sido ensayados hasta las 1000 horas; en ellos aplicaré la formulación de la norma, la cual será detallada con posterioridad, hasta el instante final, después se comparan ambos resultados para evaluar cómo de precisos son.

De cada una de las muestras, ya sean cordones o alambres, se realizarán los gráficos tanto de carga- tiempo como del porcentaje de relajación en función del tiempo.

Con ello, podré ver su evolución real en el tiempo, desde el instante inicial hasta el final, a las 1000 horas, por lo que, con dichos datos, junto con el ajuste, que permite realizar la norma, se podrá establecer como de “próximas” están ambas gráficas y, en definitiva, se podrá ver cuál de las dos situaciones se encuentra mejor desde el punto de vista de la seguridad; siendo más restrictivo y por tanto mejor, los porcentajes de relajación cuyos valores sean inferiores.

Por último, es necesario mencionar que las agrupaciones de los datos de las muestras serán en función de si son alambres de acero o cordones de pretensado.

En el caso de los cordones, podemos encontrarnos con que sean lisos o grafilados, la mayoría de los datos de los ensayos que han sido proporcionados son cordones grafilados, compuestos por 7 alambres, 6 de los cuales tienen el mismo diámetro nominal, arrollados helicoidalmente en el mismo sentido y con igual paso, alrededor de un alambre central recto; supondremos que los 7 alambres tienen el mismo diámetro para facilitar los cálculos.



Si se trata de alambres, elementos que componen una armadura básica de acero, tendremos que ver si se trata de alambres lisos o corrugados y también serán agrupados en función de su diámetro.

Tras lo expuesto con anterioridad, podemos desarrollar el objetivo de este documento y de esta forma, evaluar el grado de precisión que existe entre los resultados obtenidos a partir de la normativa vigente, mediante la extrapolación de los resultados hasta un cierto instante de tiempo, tal y como está permitido y se realiza en la mayoría de los casos y, los resultados reales del comportamiento de todas las muestras que vamos a tratar, para obtener de forma certera el error que se comete al realizar la estimación.



2. Ensayos de relajación de elementos activos y pasivos.

Marco normativo.

Dado que las muestras sobre las que vamos a realizar la evaluación de este estudio son cordones y alambres, se trata de armaduras o elementos activos, es decir, todas aquellas armaduras que se emplean en la ejecución del hormigón pretensado; por lo tanto, están trabajando antes de que dicho hormigón o elemento de hormigón, esté puesto en servicio.

Las armaduras activas, son de alta resistencia y tal y como quedo recogido en la introducción de este documento, podrán estar constituidas, por alambres, barras, cordones de 2,3 o 7 alambres (lo normal) o incluso por tendones, lo cual, queda expuesto en los artículos 31 y 32 de la Instrucción de Hormigón Estructural; EHE-08. [2]

Es necesario mencionar y definir las armaduras pasivas para poder comprender con mayor exactitud la diferencia que existe entre ambas, a pesar de que no realicemos el estudio sobre ellas.



Las armaduras pasivas son el resultado del montaje, de todo el conjunto de armaduras normalizadas que estando perfectamente solapadas y con los recubrimientos que establece la norma EHE-08, tienen una función estructural, en un molde o en un encofrado.

Además, este tipo de armaduras se emplean para hormigón armado y no empiezan a trabajar hasta que el elemento de hormigón este sometido a una acción cualquiera, tal como, el peso propio, sobrecargas de uso, acciones puntuales..., etc.

Las armaduras pasivas, son de acero y pueden estar conformadas por barras corrugadas, mallas electrosoldadas y armaduras básicas electrosoldadas en celosía.

Debido a que este tipo de ensayos de relajación se realizan sobre armaduras activas, nos centraremos en hablar de ellas en los siguientes epígrafes, de esta manera, entenderemos mejor su comportamiento durante la ejecución del ensayo de relajación.

2.1 Características mecánicas y comportamiento de las armaduras activas a relajación.

Cuando realizamos este tipo de ensayos debemos de saber cómo afecta a las estructuras o a las armaduras en general, ya que un aumento de las temperaturas en las mismas producirá una variación de las características mecánicas adoptadas en el proyecto, por lo que al aumentar la temperatura aumentará la relajación mientras que, si la temperatura se reduce, se producirá una pérdida de ductilidad en las mismas.

Por un lado, tanto los cordones de pretensado como los alambres deben de cumplir los requisitos técnicos que se establecen en la UNE 36096, de los cuales hablaremos durante el desarrollo de los siguientes epígrafes, por lo que por ahora nos centraremos en las características mecánicas que se obtienen durante el desarrollo del ensayo de



tracción realizado según la normativa UNE-EN ISO 15630-3, donde también queda definido el ensayo isotérmico de relajación de tensiones.

Las armaduras activas tienen unas características mecánicas de proyecto dependiendo de si se trata de cordones o alambres de pretensado. [3]

En el caso de los alambres, la carga unitaria máxima no será inferior que los valores que se recogen en la siguiente tabla, teniendo en cuenta únicamente los datos con los que vamos a tratar, para reducir el contenido de esta:

Diámetros (mm)	Carga unitaria (N/mm ²)
3-4-5-6	1770
4 a 5	1860

Tabla 1: valores de la carga unitaria en función de los diámetros de los alambres [3].

Como la carga unitaria está ligada con el límite elástico, tal y como queda recogido en el artículo 34 de la EHE-08, el límite elástico tendrá un valor de entre el 0,85 y el 0,95 de la carga unitaria máxima.

El alargamiento producido al someterse a la carga máxima no será inferior del 3.5% pero si los alambres van a ser usados para la fabricación de tubos, el alargamiento no será inferior del 5%.

Otro parámetro resistente importante que considerar es el módulo de elasticidad cuyo valor será aportado por el fabricante y su tolerancia puede ser del 7% en valor absoluto.

En general, las características mecánicas de los alambres pueden ser obtenidas a través de un proceso térmico de patentado, posterior trefilado y estabilizado.



Si pudiésemos elegir entre varios diámetros para los alambres, nos decantamos por el mayor valor para minimizar los defectos superficiales.

En nuestro caso, se trata de alambres aislados, por lo que los diámetros serán de 4 mm o más, lo cual, a su vez, es una recomendación que está recogida en la instrucción de hormigón.

Para saber aproximadamente los valores de la relajación, el fabricante puede facilitarlos, dichos valores van ligados a una tensión inicial de 60,70 y 80% de la carga unitaria máxima o de la real, esto se determina sobre una muestra similar a la sometida al ensayo de relajación.

En caso de que no dispongamos de estos datos por mediación del fabricante, la instrucción recoge los que se van a mostrar a continuación en la siguiente tabla:

Tensión inicial en % de Carga Unitaria Máxima	Relajación
60%	1.5
70%	2.5
80%	4.5

Tabla 2: valores de relajación para los alambres establecidos en la EHE-08. [3].

En el caso de los cordones de pretensado y teniendo en cuenta que los que usaremos para el presente estudio estarán provistos por 7 alambres, los valores de la carga unitaria máxima establecidos por la instrucción [3] serán los siguientes y al igual que los alambres, dependerán de la dimensión de su diámetro:

Diámetros(mm)	Carga unitaria máxima (N/mm ²)
16	1770
9.3-13-15.2-16	1860

Tabla 3: valores de la carga unitaria en función de los diámetros de los cordones [3].



Tal y como quedó expuesto con anterioridad, el límite elástico estará ligado a la carga unitaria máxima y su valor será de entre el 88 y el 95% de dicha carga; dicha limitación también deberá ser cumplida por las muestras ensayadas.

El alargamiento sufrido bajo carga máxima será superior al 3,5%.

Cuando nos encontremos con la posibilidad de poder escoger entre varios cordones de distinto diámetro, escogeremos el de mayor diámetro, al igual que en los alambres, para poder minimizar los impactos que se generan por los defectos superficiales.

Al igual que para los alambres, en el caso de los cordones, el fabricante puede suministrar a título informativo los valores de la relajación, que corresponden con los mismos porcentajes de la carga unitaria máxima garantizada o de la real que para los alambres y si no disponemos de esa información por parte del fabricante, los valores de la relajación también son los mismos que para los alambres. (véase la tabla 2)

En lo referente al comportamiento mecánico de las armaduras activas, ya sean cordones, cables o alambres, para poder comprenderlo, es necesario acudir al artículo 38 de la norma EHE-08, donde se explica dicho comportamiento. [4]

Al comienzo de este artículo, la norma explica el comportamiento de las armaduras pasivas, lo cual no vamos a desarrollar en este epígrafe, puesto que nuestros ensayos se realizan sobre armaduras activas.

Se puede adoptar el diagrama de tensión – deformación, característico del acero para armaduras activas, establecido por su fabricante hasta una deformación mínima de 0,01 junto con que se cumpla además de esto, que, para una deformación dada, las tensiones sean superadas en el 95% de los casos.

En caso de que el fabricante no aporte dicho diagrama, usaremos el que se muestra a continuación, [4]

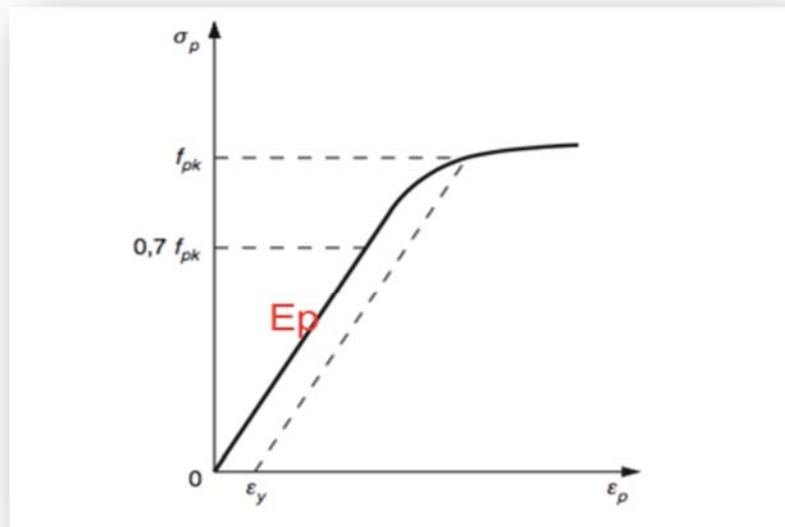


Ilustración 1: diagrama tensión- deformación característico del acero y establecido por la norma EHE-08.

Este diagrama característico del acero se divide principalmente en 2 tramos:

- ⇒ Desde el origen hasta un valor correspondiente con el 0.7 de la resistencia característica del acero, será un tramo recto, cuya pendiente tendrá un valor correspondiente al del módulo de deformación longitudinal del acero (E_p).
- ⇒ A partir de ese valor de resistencia característica del acero, será un tramo curvo definido por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 0,823 \left(\frac{\sigma_p}{f_{pk}} - 0,7 \right)^5 \quad \text{para } \sigma_p \geq 0,7 f_{pk}$$

Para poder obtener el diagrama tensión – deformación de cálculo del acero para armaduras activas, será deducido del diagrama característico recogido y definido anteriormente.

El proceso para obtener dicho diagrama de cálculo, es sencillo, por afinidad oblicua, paralela a la recta de Hooke y cuya razón es de 1 comprendido entre el coeficiente de mayoración del acero.

Dicho diagrama queda recogido en la siguiente ilustración, extraída de la norma EHE-08:

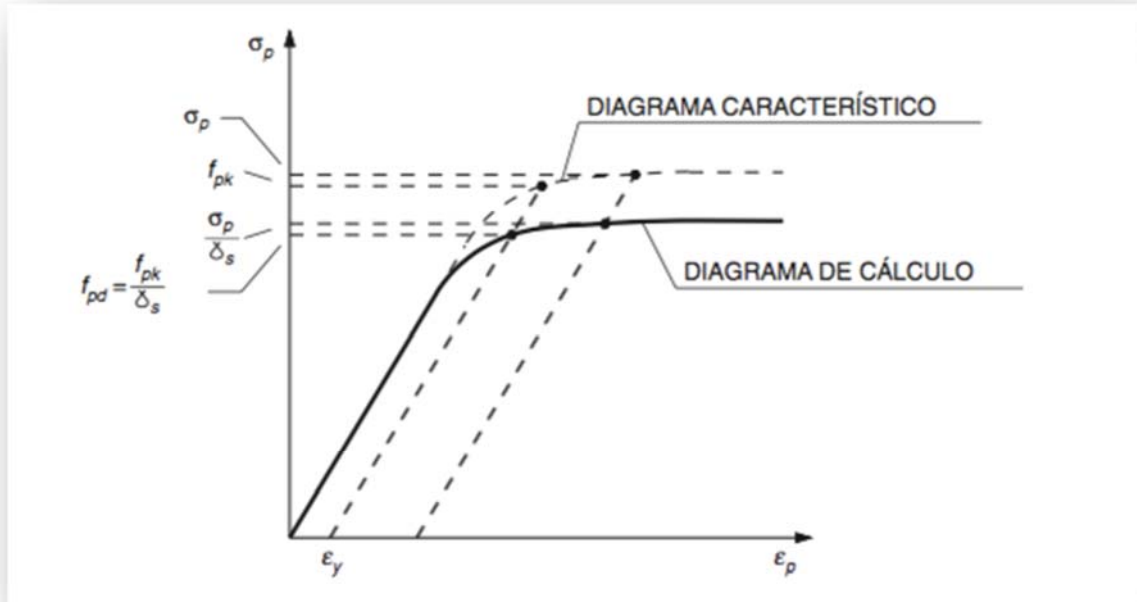


Ilustración 2: diagrama tensión- deformación de cálculo del acero en armaduras activas y establecido por la EHE-08.

2.2 Descripción del ensayo isotérmico de relajación de tensiones.

Según lo que recoge la norma ISO 15630-3:2010, [5] el ensayo isotérmico de relajación de tensiones consiste en medir la variación de fuerza en una probeta, la cual, mantiene su longitud constante y desde una fuerza inicial.

Este ensayo se realiza con una temperatura que suele ser de 20 grados salvo que se indique otra temperatura.

La relajación consiste principalmente en la reducción o disminución de un esfuerzo a lo largo del tiempo.

Cuando un material se somete a esfuerzos, se alcance o no el intervalo de deformación plástica y, súbitamente se le impide que prosiga la deformación, manteniéndola constante por algún medio externo; comienza a desarrollarse internamente en el



material un reajuste utilizando como fuerza motriz, la energía remanente de aquella que se le proporcionó durante la etapa de deformación previa. [6]

La relajación de esfuerzos es en consecuencia, una respuesta del sólido, que puede describirse como el decrecimiento o la reducción producida en el esfuerzo, dependiente del tiempo y temperatura; dicha reducción se debe a que la deformación elástica se convierte en plástica.

El ensayo de relajación de tensiones es una alternativa del ensayo de fluencia (CREEP) en caso de que investiguemos acerca de las correlaciones existentes entre las tensiones y el tiempo para una temperatura y longitud inicial dada.

A medida que se avanza en el tiempo y se va desarrollando el ensayo, se obtienen unas pérdidas de fuerza que se recogen como porcentajes de la fuerza inicial, para dichos intervalos de tiempo.

En lo referente a la probeta, esta debe de mantenerse recta y la longitud libre existente en dicha probeta entre sus mordazas, no debe de haberse visto afectada por ningún tratamiento que implique la deformación de esta.

Toda la deformación que se produzca a lo largo del ensayo deberá estar dentro de unos límites previamente establecidos, para evitar que afecte a los resultados del ensayo.

En cuanto al dispositivo empleado para poder medir la fuerza, se empleará o bien una célula de fuerza coaxial u otro tipo de dispositivo que sea apto para poder llevar a cabo el ensayo.

La calibración de la célula de descarga se realiza según la norma ISO 7500-1 [6] cuya precisión varía en función de la dimensión de las fuerzas de que dispongamos.



Los valores límite o tolerancias permitidas, de la fuerza inicial (F_0), la cual debe de quedar correctamente especificada en la norma; no deben de sobrepasar los siguientes en función de la dimensión de la fuerza:

- ❖ $\pm 1\%$ cuando tengamos fuerzas de hasta 1000 KN.
- ❖ $\pm 2\%$ para fuerzas mayores de 1000 KN.

Según lo establecido en la norma [5] está prohibido que la fuerza supere a la fuerza inicial en más que los valores límite expuestos con anterioridad.

A continuación, se muestra en la siguiente ilustración, una de las máquinas de ensayo empleadas y recogidas en la norma ISO 7500-1.



Ilustración 3: maquinaria de ensayo. [7]

Si no se emplea la célula de descarga, el dispositivo por el que la sustituimos debe de asegurar la misma precisión que el mismo y cumplir todos los requisitos y funciones para el completo desarrollo del ensayo.

La resolución de la salida del dispositivo por el que sustituimos la célula de descarga tendrá que ser de al menos del 5×10^{-4} del valor de la fuerza inicial.

Para medir la longitud, el dispositivo que se emplea es el extensómetro; se establece que la distancia entre marcas (L_0), no debe de ser menor de 200 milímetros.



En caso de disponer de cordones, la distancia entre marcas será de unos 1000 milímetros o bien de un número entero del paso del conjunto de cordones que conforman el cordón, cuando la longitud real (L_0 + el incremento de longitud producido) se mida sobre el mismo cable o cordón.

En este caso, el extensómetro tendrá que tener una calibración que garantice una resolución de 1×10^{-6} del valor de la distancia entre marcas o bien de $1 \mu\text{m}$, dependiendo de cuál sea el mayor de ambos valores.

El dispositivo de anclaje debe de estar dispuesto de tal forma que se imposibilite la opción de que se pueda producir un corrimiento durante la ejecución del ensayo, o bien, en caso de que se produzca este fenómeno, pueda corregirse. [5]

La rotación que pueda producirse en el dispositivo de anclaje debe de poder ser evitada.

En cuanto al dispositivo de carga, debe permitir incrementos suaves de carga sin cambios bruscos.

Este dispositivo, debe construirse cumpliendo que la longitud (L_0 + incremento de longitud producido) pueda mantenerse dentro de los límites establecidos que se definirán a lo largo de este epígrafe.

2.3 Procedimiento del ensayo isotérmico de relajación de tensiones.

Para poder desarrollar de la mejor manera posible este epígrafe, es necesario mencionar que la probeta debe de estar en el laboratorio 24 horas aproximadamente antes de que este ensayo comience.



La probeta debe de estar perfectamente sujeta a los anclajes, siempre respetando las condiciones de seguridad para que de esta manera no deslice ni cuando esté sometida a la carga ni en ningún momento del ensayo.

A continuación, en la ilustración 4, se muestra una probeta donde se ve la longitud que debe permanecer constante a lo largo de la ejecución de este ensayo: [5]

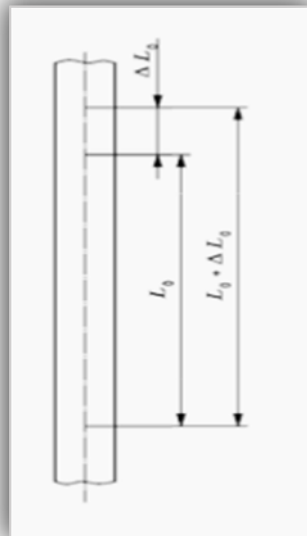


Ilustración 4: esquema de una probeta de ensayo. [5]

Tal y como quedo recogido en el epígrafe anterior, la carga debe de aplicarse de manera suave y sin cambios bruscos; el esquema en que se realiza dicha aplicación es el siguiente:

- ⊕ Hasta el 20% de la fuerza inicial, la carga puede ejecutarse como se prefiera.
- ⊕ Entre el 20% y el 80% de la fuerza inicial, la carga de la probeta se aplicará de manera continuada (o en mínimo 3 pasos uniformes o bien, a una velocidad uniforme) esta fase debe de ser completada en 6 minutos.
- ⊕ Entre el 80% y el 100% de la fuerza inicial, la carga será continua y se completará en 2 minutos, tras ya haber alcanzado el 80%.



- ⊕ Ya alcanzado el 100% de la fuerza inicial, esta se deberá mantener constante durante 2 minutos, cuando se alcance dicho instante se registrará y se obtendrá el instante inicial, t_0 .

Todos los ajustes que se realicen a partir de que se alcance ese instante y de que se alcance dicho valor de fuerza, serán realizados para asegurarnos de que la longitud se mantiene sin sufrir ninguna variación.

A continuación, en la siguiente ilustración se muestra la evolución en el tiempo, de la relación existente entre la fuerza aplicada y la fuerza inicial: [8]

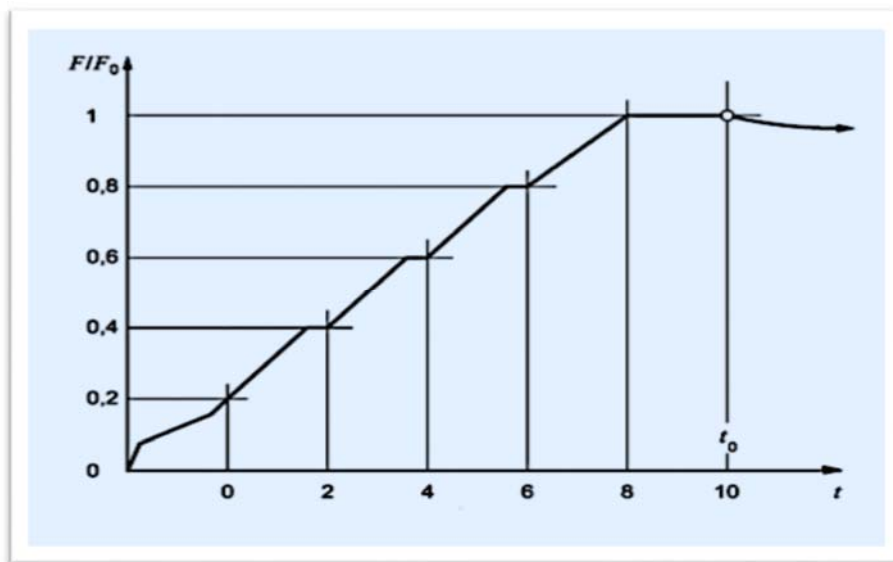


Ilustración 5: esquema de variación de la fuerza según la norma ISO 15630-3:2010. [8]

Cabe mencionar que, en lo referente al mantenimiento de la deformación, la que se produce en el instante inicial (t_0), es decir, la impuesta por la fuerza inicial debe de medirse con un extensómetro mecánico, óptico u eléctrico que nos garanticen la precisión en lo que se refiere a la dimensión de la longitud inicial entre marcas escogida, es decir, “ l_0 ”.



La variación del incremento de longitud inicial quedará comprendida entre los siguientes valores:

- ⊕ Incremento no inferior a $5 \times 10^{-6} L_0$ o $5 \mu\text{m}$, la mayor, durante la medición.
- ⊕ Incremento no superior a $7 \times 10^{-6} L_0$ o $7 \mu\text{m}$, la mayor, entre dos mediciones consecutivas.

La temperatura de la probeta tal y como ya se mencionó durante el desarrollo del epígrafe anterior, será de 20 grados centígrados y cuya tolerancia oscilará 2 grados en valor absoluto, es decir, en positivo o en negativo.

La frecuencia del registro de la fuerza se realizará de manera continua o al menos se medirá en todos y cada uno de los intervalos que se muestran a continuación en la siguiente tabla:

MINUTOS	1	2	4	8	15	30	60
HORAS	2	4	6	24	48	96	120

Tabla 4: Intervalos de tiempo estándar de los registros de la fuerza RECOGIDOS EN LA ISO 15630-3:2010. [5]

Después de que hallamos medido o registrado la pérdida de fuerza a lo largo de los intervalos recogidos en la tabla 4, debemos de seguir estableciendo una frecuencia de registros tras el comienzo del ensayo y a partir de dicho instante, realizarlos al menos una vez por semana.

Tal y como se trató durante el desarrollo de la descripción de la descripción del procedimiento en el epígrafe anterior, la deformación medida por el extensómetro, deberá de ser registrada de manera uniforme y continua; mínimo durante las mediciones de la fuerza y 2 veces entre 2 mediciones de fuerza consecutivas sin variar los intervalos de tiempo. En las figuras 6 y 7 se muestra una imagen de las bancadas para



ensayos de relajación que se han empleado para la obtención de los datos a tratar en el presente trabajo.



Ilustración 6: bancadas empleadas para obtener los datos usados en este documento.



Ilustración 7: bancadas empleadas para obtener los datos usados en este documento.

La duración del ensayo no puede ser inferior a 120 horas, teniendo en cuenta que todas las muestras que vamos a evaluar han alcanzado las 1000 horas lo cual es lo habitual.

En la norma [] queda expuesto que el valor correspondiente de la relajación de tensiones a 1000 horas puede extrapolarse usando ensayos que hayan sido realizados en periodos



de tiempo no inferiores a 120 horas en los que exista una evidencia muy clara de que el valor que se va a extrapolar a las 1000 horas sean similar o equivalente al valor real que tendría que tener para ese mismo tiempo.

La fórmula habitualmente empleada para realizar esta extrapolación es la siguiente []:

$$\log(R) = m \cdot \log(t) + n$$

Los parámetros de la formula anterior son los que describo a continuación:

- ⊕ R: relajación expresada en porcentaje.
- ⊕ t: tiempo en horas.
- ⊕ m,n: coeficientes.

En definitiva, la normativa [5] nos permite extraer o extrapolar los valores de relajación al final del ensayo (a las 1000 horas) y haciéndolo a partir de las 120 horas que es el mínimo intervalo temporal permitido.

Por lo que se va a evaluar la tolerancia que se produce, agrupando nuestras muestras ya ensayadas según sus características y propiedades resistentes, entre los valores obtenidos tras ver mediante la fórmula descrita anteriormente, el comportamiento real de nuestras muestras durante el ensayo y los valores que han sido extrapolados.

En base a los datos de informes de relajación del laboratorio LADICIM, realizados entre 2012 y 2017 [], se van a obtener las gráficas de la evolución de la relajación en el tiempo a partir de los datos de las primeras 240h a partir de la formula anterior para compararlos con la evolución real de los mismos hasta las 1000 horas.





3. Materiales y metodología.

Para poder comprender con claridad se realiza la comparación de las diferentes muestras, ya sean cordones o alambres y la posterior agrupación de los, es necesario realizar una descripción de ambos materiales tanto de su funcionamiento como armaduras activas como de sus principales propiedades.

Ambos materiales tienen unas características muy específicas, las cuales vienen perfectamente recogidas en la normativa UNE 36094-1997, lo cual se detallará en el siguiente epígrafe. [10]

3.1 Agrupaciones de los materiales según la instrucción UNE 36094-1997.

La instrucción [10] busca aproximarse a los requisitos que se establecen en Europa para los productos de acero en lo referente a las armaduras de hormigón pretensado.

Estos productos de acero incluyen a todos aquellos que no sean aleados de acuerdo con la normativa UNE-EN 10016-4.



Dichos requisitos vienen recogidos en el proyecto prEN 10138, del cual también extraeremos datos importantes para el completo desarrollo de este documento. [11]

Esta normativa también realiza algunos cambios sobre la nomenclatura de los materiales, entre otros, la eliminación del nombre “torzal”, al cual le atribuyen el termino cordón, ya sea de 2 o 3 alambres.

Para poder homogeneizar dichos alambres, los diámetros normalizados se simplificarán, de esta forma se facilitará el poder agruparlos, como en el caso de nuestro estudio, cuando realicemos la agrupación de los materiales.

Estas armaduras activas, también pueden ser usadas para anclajes en el terreno, tirantes de puentes o incluso, para tuberías de hormigón. Por otro lado, esta normativa excluye aquellos alambres o cordones que han conseguido su resistencia mediante tratamientos de revenido y temple.

La fragmentación que establece la norma en estos materiales es realizada por secciones donde incluye, los requisitos generales de los productos si se trata de la sección Uno, las características específicas que deben cumplir los alambres lisos o grafilados destinados a la fabricación de armaduras de hormigón pretensado si se trata de la sección Dos. Mientras que, si hablamos de la sección Tres, esta recoge las características específicas de los cordones de alta resistencia y por último, la sección Cuatro, establece las condiciones que deben cumplir tanto los alambres como los cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado.

Todo lo descrito anteriormente va a ser detallado a continuación para comprender con mayor exactitud el funcionamiento y comportamiento de estos materiales, ya sean cordones o alambres, pero debemos de enunciar de la norma [10] las siguientes definiciones destacadas por dicho documento y definidas literalmente como vienen en



ella para de esta forma, ver sus principales diferencias y poder realizar en el capítulo 4 la agrupación de los distintos ensayos:

Se entiende por *alambre* [10], al producto de sección maciza, liso o grafilado, procedente de un estirado en frío o trefilado de alambrón, posteriormente sometido a un tratamiento de estabilización, que se suministra normalmente en rollos.

- ❖ Alambre liso: aquél cuya superficie es la obtenida directamente en la hilera, que mantiene su sección transversal recta constante con independencia de la forma de ésta, y no presenta irregularidades periódicas en sentido longitudinal. Su eje es teóricamente recto.
- ❖ Alambre grafilado: Es aquél cuya superficie presenta rehundidos o resaltos (grafilas) periódicamente distribuidos a lo largo de su longitud, con objeto de mejorar su adherencia con el hormigón. En nuestros ensayos son todos grafilados.

Debido a que los alambres están sometidos al proceso de trefilado es necesario definirlo, siendo este un Proceso mediante el cual se reduce la sección de un alambrón, haciéndolo pasar por una hilera.

Por otro lado, en lo referente al proceso de estabilización que se les realiza, se entiende como tal, a aquel tratamiento termo mecánico que, además de los objetivos de eliminación de tensiones, da lugar a una reducción adicional de la relajación.

Se entiende por *cordón*, al producto formado por un número de alambres arrollados helicoidalmente en el mismo sentido y con igual paso, posteriormente sometido a un tratamiento de estabilización. Dichos cordones, se diferencian por el número de alambres, luego nos encontraremos con los siguientes casos:



- ❖ Cordones de 2 alambres: Dos alambres, del mismo diámetro nominal, arrollados helicoidalmente, con el mismo paso y en el mismo sentido, sobre un eje ideal común.
- ❖ Cordones de 3 alambres: Tres alambres, del mismo diámetro nominal, arrollados helicoidalmente, con el mismo paso y en el mismo sentido, sobre un eje ideal común.
- ❖ Cordones de 7 alambres: Seis alambres, del mismo diámetro nominal, arrollados helicoidalmente, en el mismo sentido y con igual paso, alrededor de un alambre central recto. En nuestro caso, todos los cordones estarán compuestos por 7 alambres.

Los cordones también pueden ser lisos o grafilados. En caso de que sean grafilados, se fabrican con alambres grafilados ya definidos anteriormente.

Otro de los conceptos fundamentales que se debe enunciar y cuya definición viene recogida en la norma [10] es el de diámetro nominal, cabe destacar que la agrupación que realizaremos para posteriormente comparar los ensayos se realizara entre otras cosas a partir de este término por lo que es fundamental en nuestro estudio.

Por lo tanto, tal y como se ha expuesto en el párrafo anterior, el diámetro nominal de un alambre grafilado, se define como el que corresponde a un cilindro de revolución, de sección circular, de igual masa por unidad de longitud que la de la muestra dada.

Es un número convencional respecto al cual se establecen las tolerancias, y que se indica en las tablas de esta norma [10] a efectos de designación.

A partir del diámetro nominal se obtienen los valores nominales del perímetro, área de la sección transversal recta y masa por metro lineal, adoptando convencionalmente como masa específica del acero el valor $7,85 \text{ kg/dm}^3$.



Se tiene que discernir entre diámetro nominal y real de los cordones por lo que a continuación se muestran sus definiciones: [10]

- ⇒ Diámetro nominal de los cordones: número que coincide con el diámetro del círculo circunscrito a una sección recta ideal, perfectamente conformada, con alambres de medida y forma teóricas. Se utiliza para designar el cordón y para establecer las tolerancias.
- ⇒ Diámetro real del cordón: el que resulta de la medición de un cordón con un micrómetro o pie de rey adecuado (lo cual queda recogido en la norma UNE 36701), excepto para los cordones de 3 alambres.

En este caso, todos los cordones estarán constituidos por 7 alambres por lo que a continuación se muestra una imagen donde se puede apreciar lo ya tratado anteriormente, es decir, el diámetro real de los cordones con dicha composición:

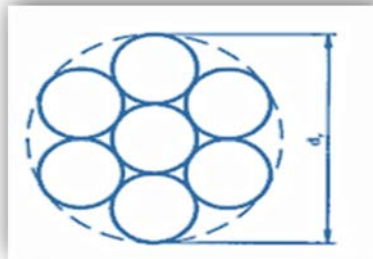


Ilustración 8: cordón compuesto por 7 alambres. [10]

La sección metálica nominal es también, un parámetro que debemos definir ya que dependerá de la geometría y, por tanto, de si se trata de un cordón o de un alambre:

- ⇒ Sección nominal del alambre: es el área correspondiente al diámetro nominal, tomado como base para establecer las tolerancias.
- ⇒ Sección nominal del cordón: es la suma aritmética de las secciones metálicas nominales de los alambres que forman el cordón.



3.2 Metodología

Para comenzar a desarrollar este apartado, es necesario mencionar que las muestras que se han evaluado son alambres lisos en su mayoría y cordones conformados por 7 alambres. Esta es la primera agrupación de muestras que se realiza, mientras que posteriormente la criba de las mismas se realiza en función de sus características geométricas y físicas, principalmente en función de la dimensión de sus diámetros.

Se sabe que tal y como queda recogido en el capítulo anterior, los alambres se diferencian entre si son lisos o grafilados, lo siguiente es agruparles en función de su diámetro; lo mismo se hace con los cordones, aunque en este último caso, al estar todos provistos por 7 alambres, son separados directamente por la dimensión de su diámetro para poder conseguir una muestra representativa de cada uno de ellos y en el capítulo de resultados se apreciará aquellos de los que se disponía de más resultados.

- Alambres lisos
 - Diámetro entre 4 y 6 mm (AL 4-6)
 - Diámetro entre 7 y 9,5 mm (AL 7-9,5)
- Alambres grafilados
 - Diámetro entre 4 y 6 mm (ALG 4-6)
 - Diámetro entre 7 y 9,5 mm (ALG 7-9,5)
- Cordones de 7 alambres
 - Diámetro entre 12,5 y 13 mm (COR 12,5-13)
 - Diámetro entre 15 y 16 mm (COR 15-16)

Para poder evaluar los ensayos de las diferentes muestras proporcionadas, he empleado la herramienta de hoja de cálculo Microsoft Excel [].



Mediante dicho programa se han elaborado los gráficos a partir de los datos de cada uno de los diferentes cordones y alambres, de cómo se van relajando conforme van evolucionando dichos ensayos en el tiempo, hasta que alcanzan las 1000 horas de duración.

Como el procedimiento es similar tanto para los cordones como para los alambres, es decir, para todas y cada una de las muestras a evaluar, voy a añadir a continuación las explicaciones pertinentes de la metodología empleada, a partir de gráficos, los cuales también serán descritos para poder comprender con mayor exactitud todo el proceso realizado.

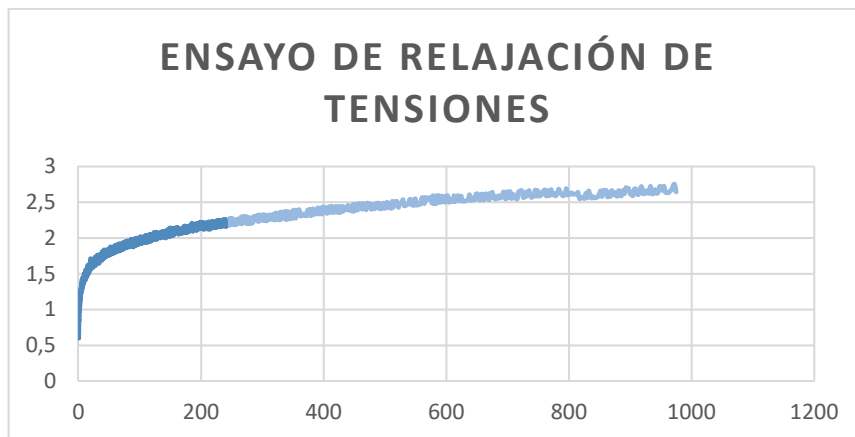


Ilustración 9: Ejemplo de curva de relajación a 1000 horas

En el gráfico anterior, el cual ha sido realizado sobre una de las muestras y escogido de manera aleatoria para poder desarrollar este epígrafe, describe la evolución de cómo se relaja (eje y, valores de la relajación en porcentaje) un alambre cualquiera, en función del tiempo (eje x, en horas), hasta las 1000 horas que es cuando finaliza dicho ensayo.

Se sabe que la normativa nos permite idealizar una parte de los resultados del ensayo de relajación de tensiones, a partir de la ecuación logarítmica recogida en el epígrafe 3.1, desde su tiempo inicial hasta las 240 horas de duración.



De esta forma, se linealiza esa parte del gráfico, de la relajación frente al tiempo, para poder obtener los coeficientes de la ecuación ya descrita con anterioridad y expuesta a continuación

$$\log(R) = m \cdot \log(t) + n$$

Por un lado, realizando dicha linealidad y sirviéndonos del programa Excel, ya podemos obtener los valores de los coeficientes “m” y “n” de dicha ecuación, en todas y cada una de las muestras a evaluar.

Tras conocer los coeficientes “m” , “n” y, además como se conoce el valor del tiempo a lo largo de todo el ensayo, se puede obtener el “nuevo valor estimado de relajación”, permitido por la norma, y para todos y cada uno de los instantes del ensayo.

En el siguiente gráfico se muestra la ecuación y por consiguiente las constantes que la conforman, que obtenemos de una muestra aleatoria tras linealizar.

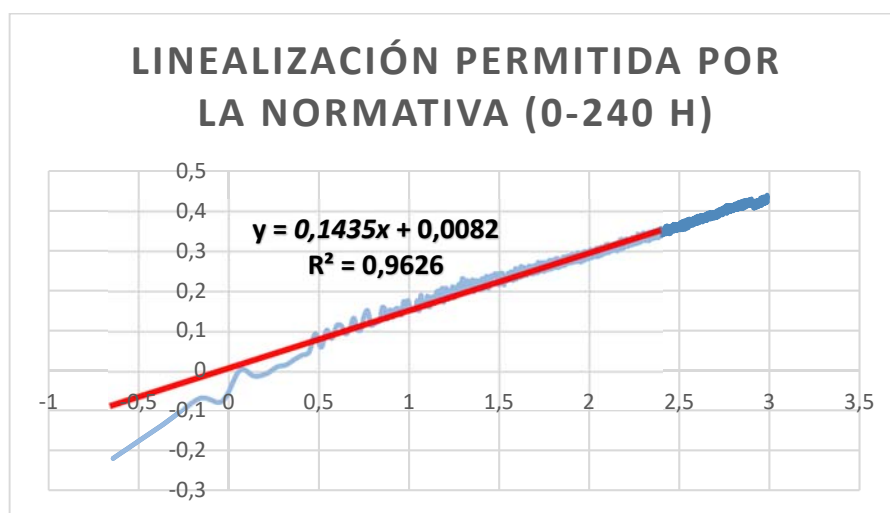


Ilustración 10: Ejemplo de ajuste logarítmico

La línea roja del gráfico anterior es el ajuste que se realiza permitido por la normativa, para poder obtener todas las ecuaciones de las muestras a evaluar, en este caso dicha ecuación sería “ $y = 0,1435 \cdot x + 0,0082$ ”.



A partir de esto, se puede obtener con dicha ecuación, los valores estimados de la relajación y posteriormente la curva que representa dichos valores.

Para este ejemplo, los valores de los coeficientes nos han dado los siguientes resultados:

- $m = 0,1435$.
- $n = 0,0082$.

Según la ecuación obtenida en el gráfico anterior, la nomenclatura asignada, comparándola con la ecuación recogida en la norma, será en primer lugar; el logaritmo del tiempo, al que le corresponde el valor de “x”, mientras que, por otro lado, al logaritmo de la relajación, le corresponde el valor de “y”.

Como ya tenemos la ecuación, se puede conocer cualquier “nuevo valor, de relajación estimado” en todos y cada uno de los intervalos de tiempo del ensayo, es decir, desde las 240 horas hasta las 1000 horas; el resultado de lo ya descrito se muestra en el siguiente gráfico:

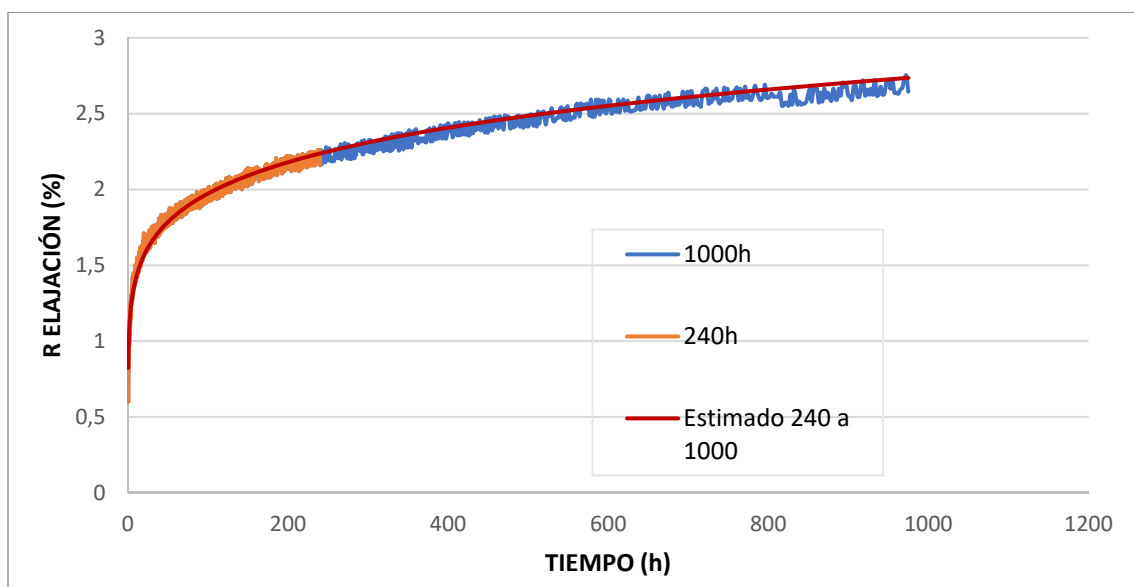


Ilustración 11: Comparación de ensayo real a 1000 horas y estimación a partir de ajuste desde 240 horas.



El **ajuste** corresponde con la **línea roja**, estimado desde 240 horas hasta las 1000 horas, por lo que esa es la “nueva curva de relajación frente al tiempo, estimada” mientras que lo que se encuentra debajo (línea azul y naranja) es lo correspondiente al primer gráfico ya descrito en este epígrafe; gráfico que recoge como se relaja una muestra frente al tiempo.

Tal y como puede apreciarse, el ajuste está por encima de la línea azul, por lo que en este caso, está dentro del lado de la seguridad, lo cual ya será descrito en el apartado 5 durante el desarrollo de las conclusiones.

En definitiva, este es el proceso que se va a realizar con todas y cada una de las muestras, ya sean cordones o alambres, posteriormente serán agrupadas en función de sus características geométricas y físicas, principalmente en función de su diámetro, si los alambres son grafilados o no, si los cordones disponen de 7 alambres o menos, entre otras.

Para poder completar este epígrafe, es necesario destacar que la mayoría de las muestras proporcionadas de cordones de que se dispone son de 7 alambres por lo que con el resto de las muestras de este tipo no se podrá realizar una evaluación eficiente debido a que no se tienen suficientes ensayos, en definitiva se podrá realizar una evaluación principalmente de cordones de 7 alambres.

Con todo lo ya descrito, se podrá obtener conclusiones acerca del comportamiento individual y conjunto de todas las muestras frente al fenómeno de relajación.

A partir de la metodología empleada, se podrá ver si el ajuste establecido y permitido por la normativa, comparándolo con el comportamiento frente a relajación de dichas muestras, está del lado de la seguridad o no. Lo cual se realizará tras la agrupación de dichas muestras ya que desarrollar una evaluación individual no tiene sentido alguno.



4. Resultados experimentales y análisis

Tras extraer de un disco local ensayos de relajación realizados en el departamento de materiales de la escuela de ingenieros de caminos, canales y puertos de Santander desde el año 2012 aproximadamente hasta la actualidad, los cuales, han sido realizados sobre cordones y alambres con distintas dimensiones y propiedades; he podido obtener mediante la realización de hojas de excel los resultados que mostrare en este epígrafe.

Además, es necesario mencionar que dichos resultados estarán agrupados también teniendo en cuenta si los alambres son lisos o grafilados y en el caso de los cordones, todas las muestras que me han proporcionado están compuestas por 7 alambres.

Dicho este, este epígrafe se fragmentará en 2 apartados, en función de si los ensayos se han realizado sobre alambres o sobre cordones.



4.1 Resultados de los alambres lisos

Comenzaré a mostrar los resultados que he obtenido en los diferentes alambres, en función del tamaño de su diámetro.

En los siguientes epígrafes aparecerán ordenados los alambres en función de si son lisos o grafilados y agrupados a medida que aumenta su diámetro, dicha agrupación se especificó en el apartado 3.2 correspondiente a la metodología empleada del presente documento.

4.1.1 Alambres lisos de diámetro 4-6 milímetros.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante gráficos, de los alambres lisos de diámetro 4-6 milímetros; de los cuales se han obtenido 6 muestras representativas:

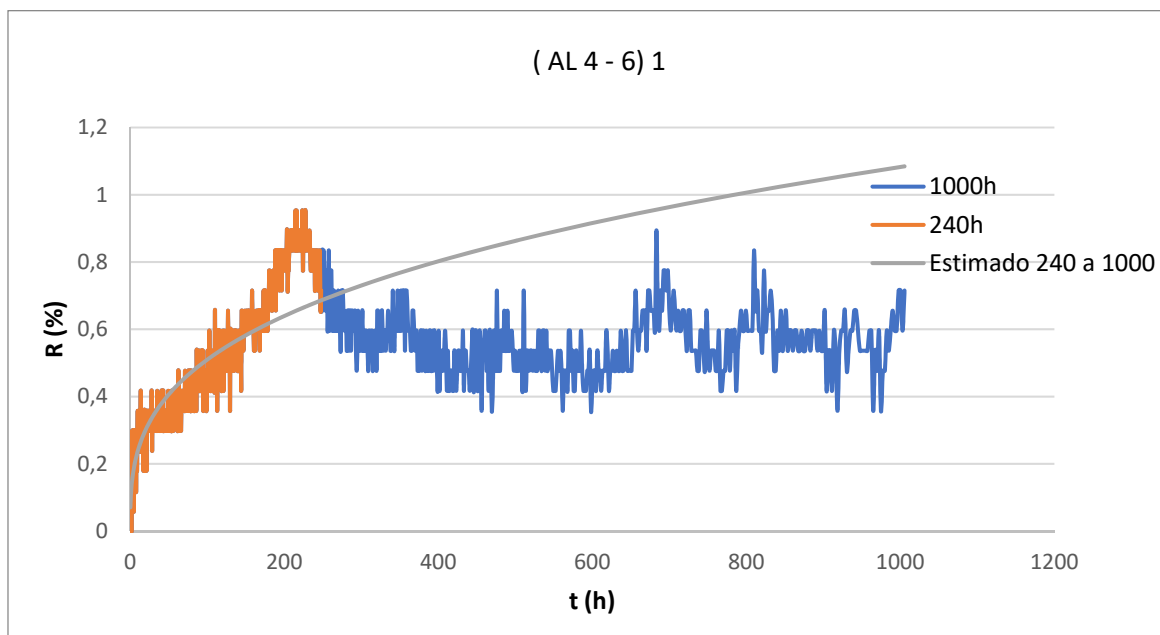


Gráfico 1: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

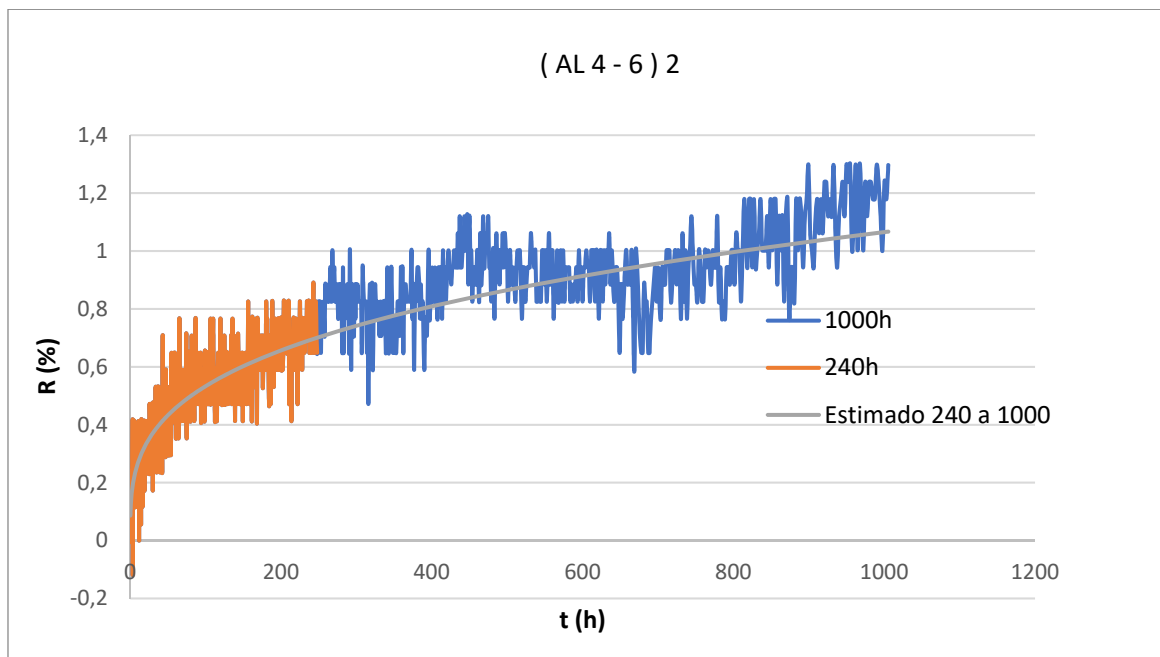


Gráfico 2: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

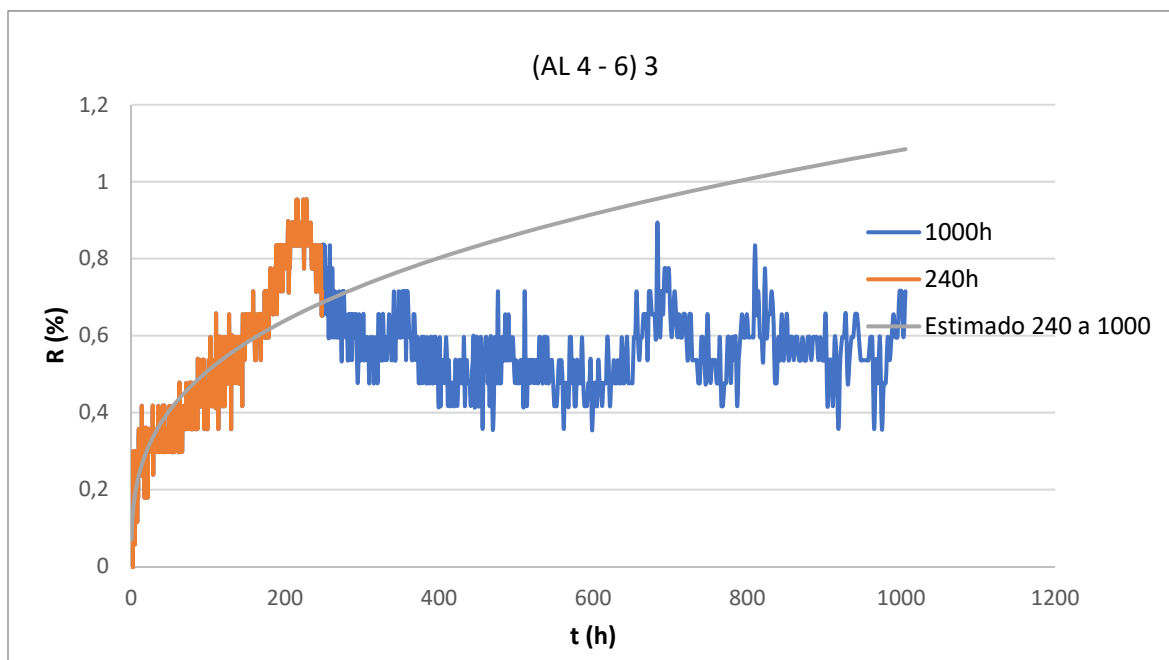


Gráfico 3: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

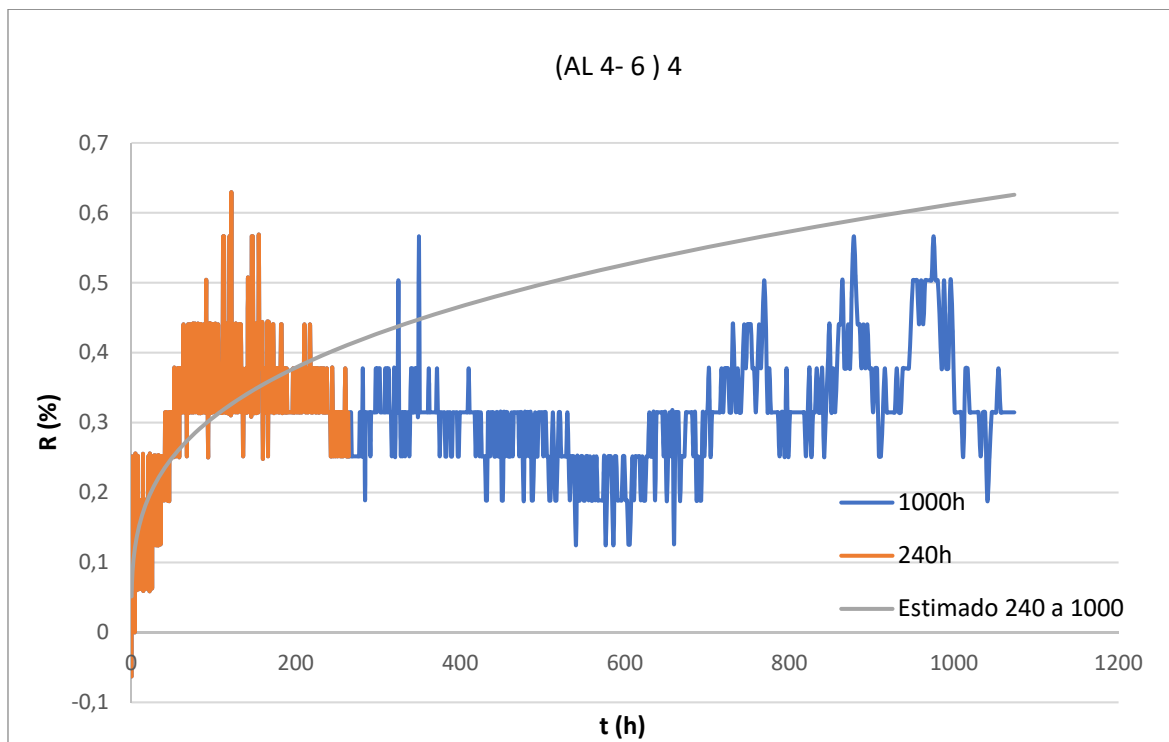


Gráfico 4: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

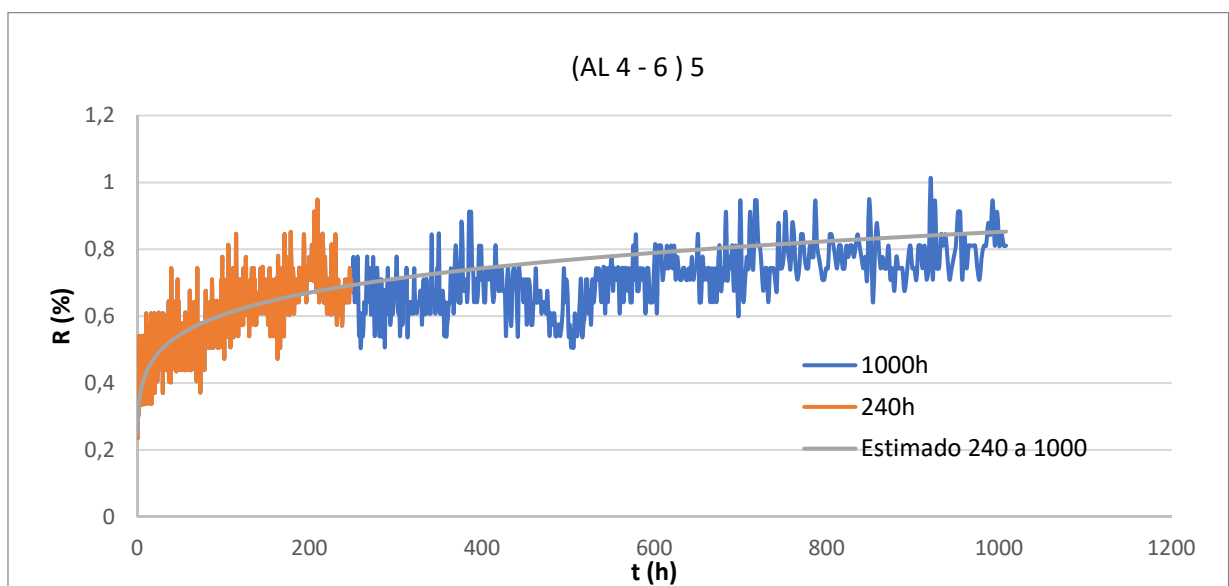


Gráfico 5: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

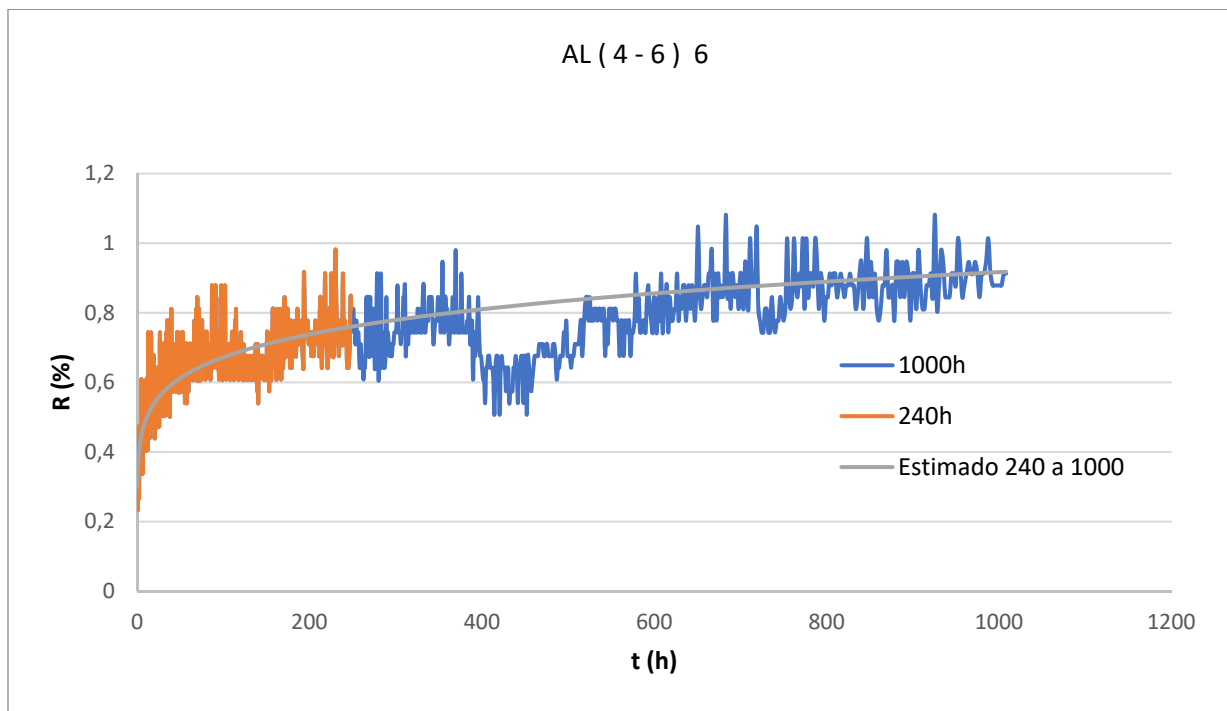


Gráfico 6: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 4-6 mm.

Para las 6 muestras de alambres lisos con un diámetro que oscila entre 4 y 6 milímetros que se han evaluado, en el 50% de la curva estimada más o menos ha coincidido con la curva real, pero en la otra mitad la estimación no ha sido muy buena, quedando por encima de la curva real del ensayo de relajación en valores comprendidos entre +0,25% y +0,40%.

Es decir que en la mitad de las ocasiones se ha sobreestimado el valor del parámetro de relajación. Aunque puede destacarse que estas diferencias quedan del lado de la seguridad.

4.1.2 Alambres lisos de diámetro de 7 a 9,5 milímetros.

En el caso de los alambres lisos, los resultados obtenidos tras la evaluación de las 10 muestras de que se han dispuesto, no tienen nada que ver con los obtenidos en los grafilados, tal y como se muestra en los siguientes gráficos:

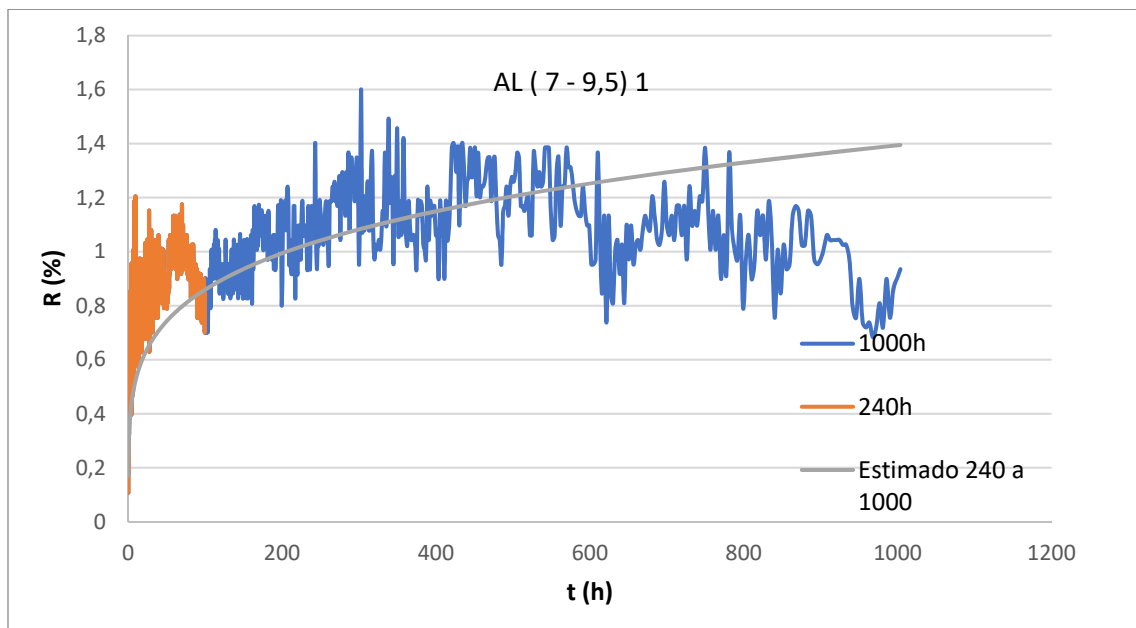


Gráfico 7: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

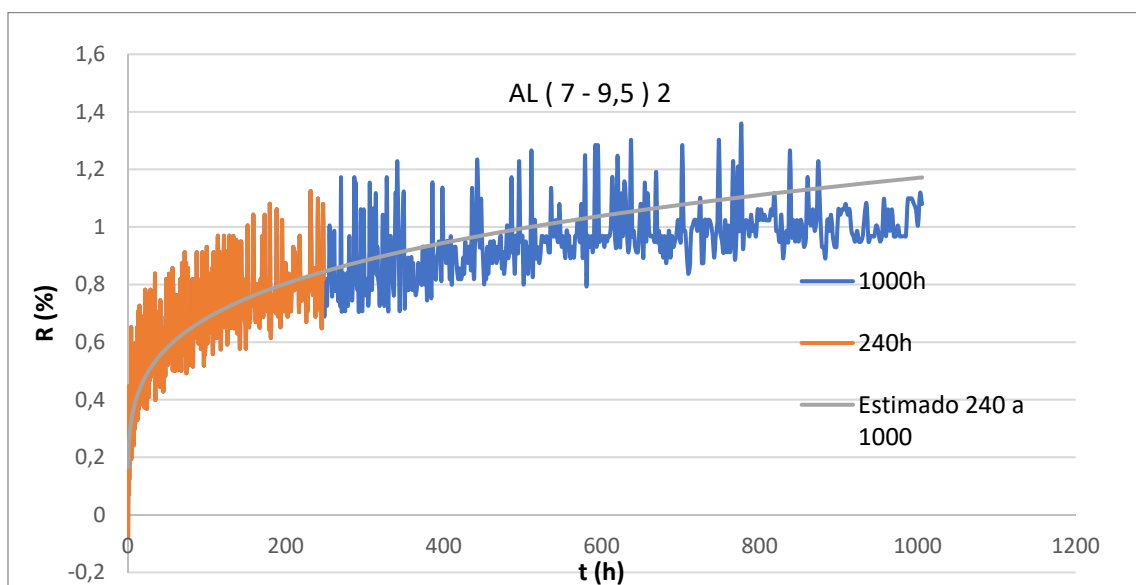


Gráfico 8: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

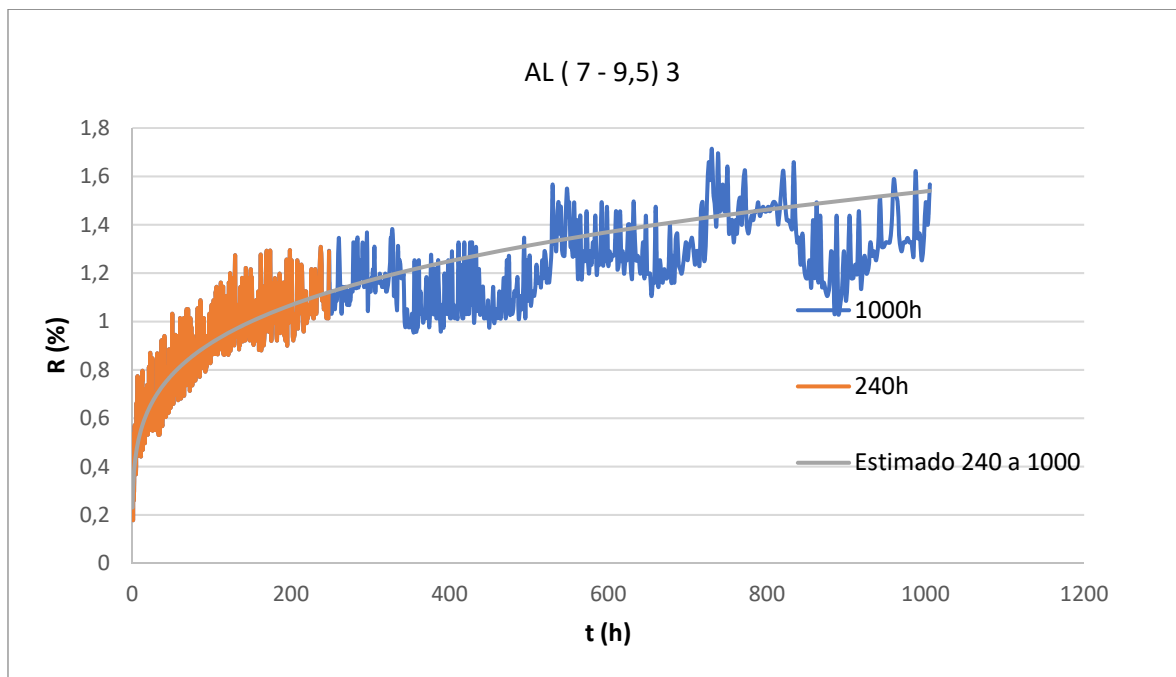


Gráfico 9: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

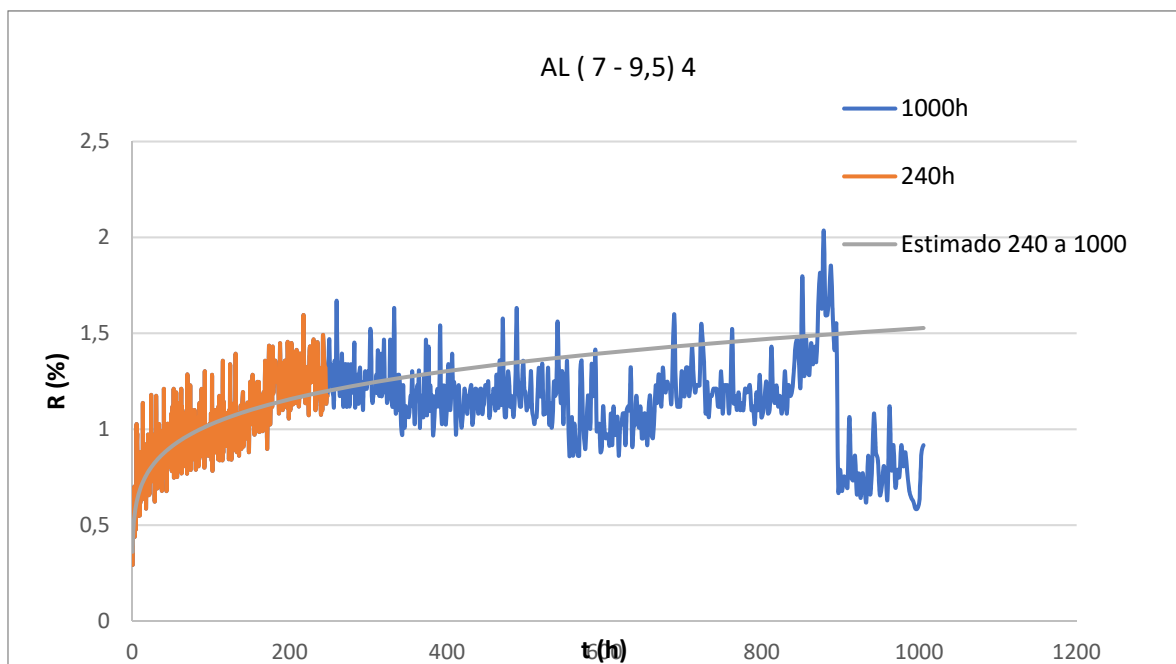


Gráfico 10: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

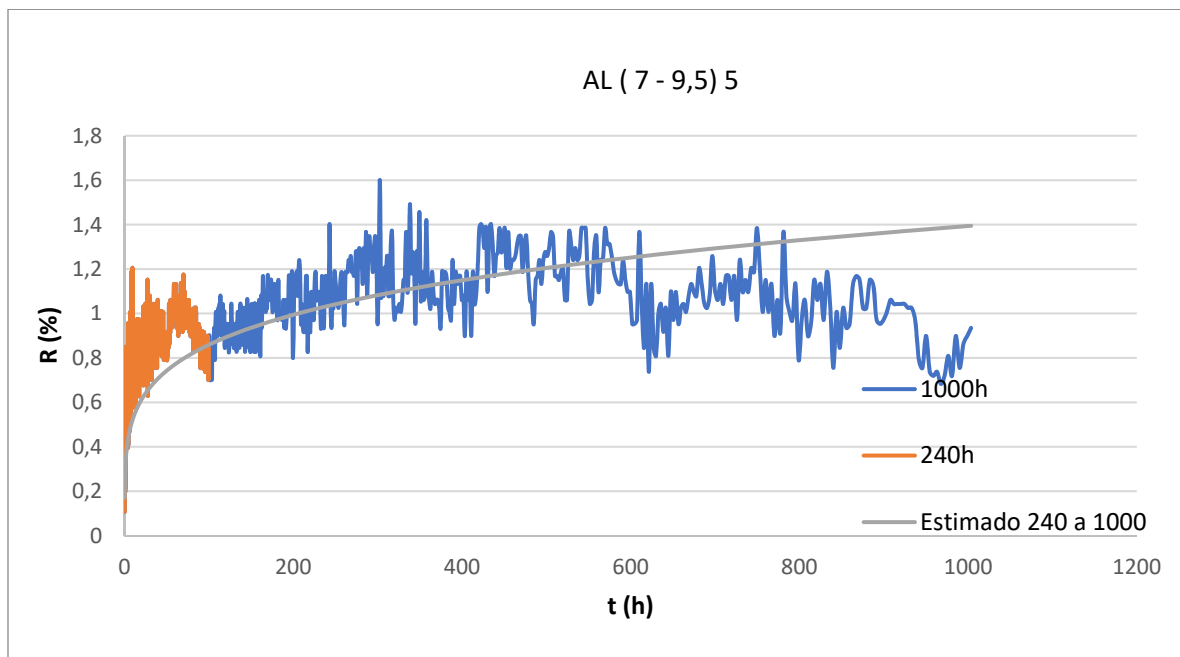


Gráfico 11: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

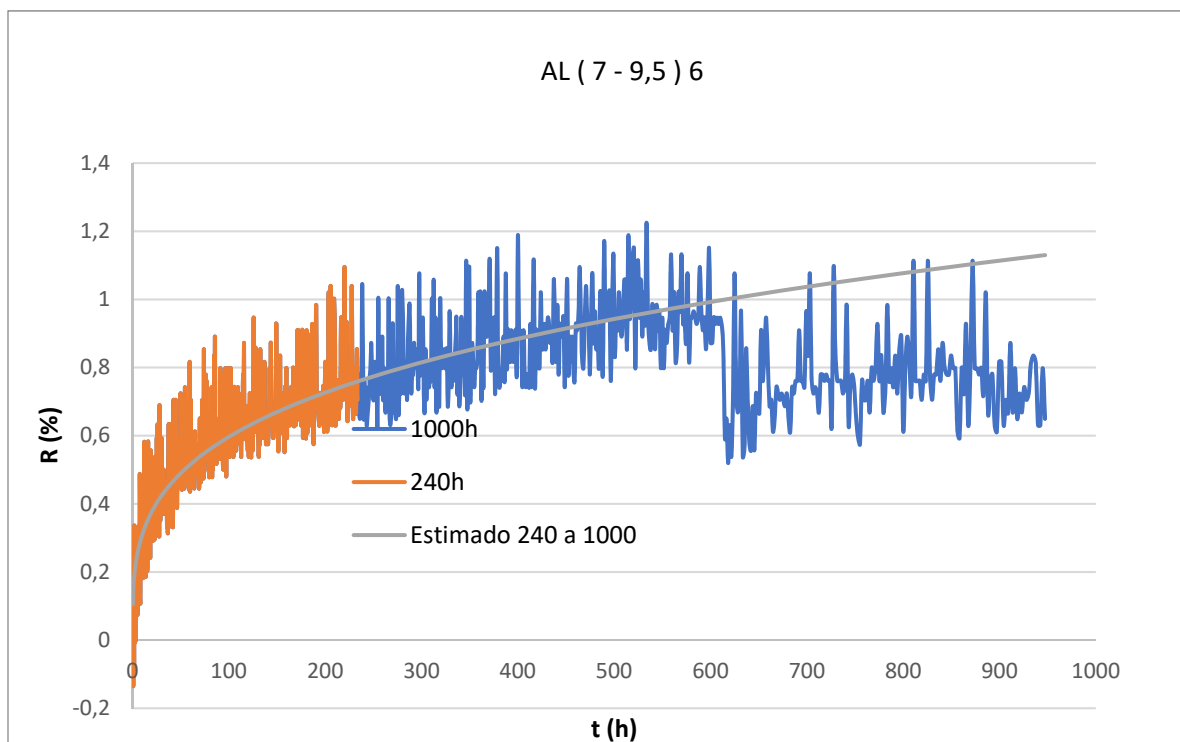
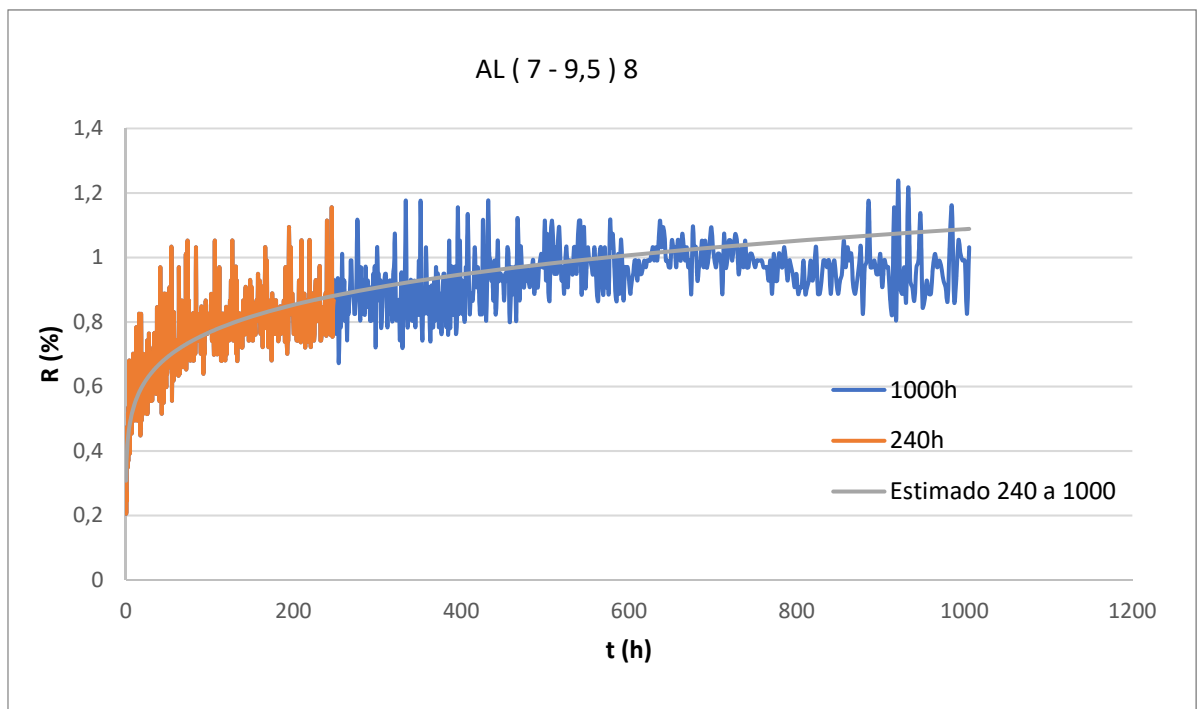
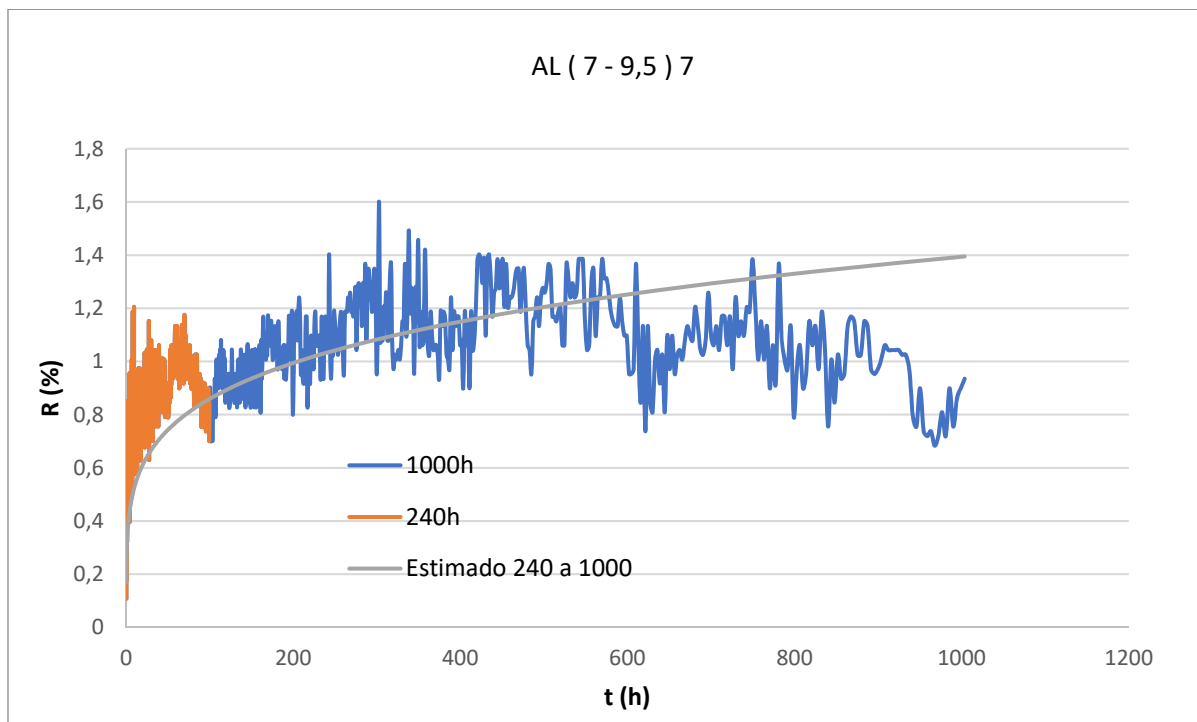


Gráfico 12: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.



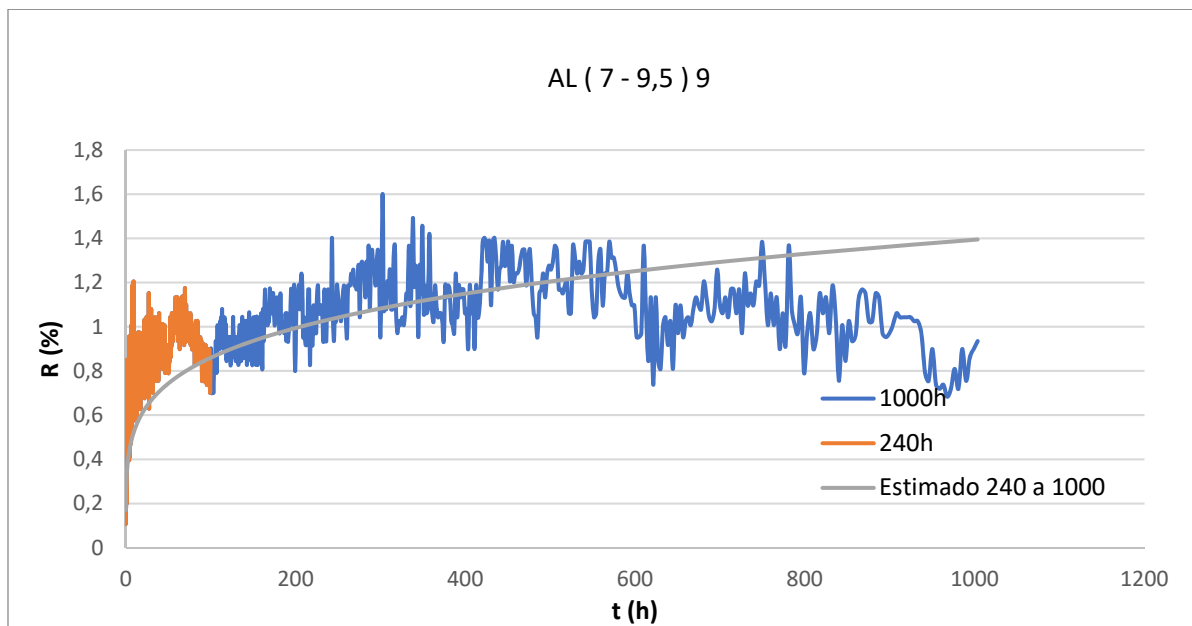


Gráfico 15: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

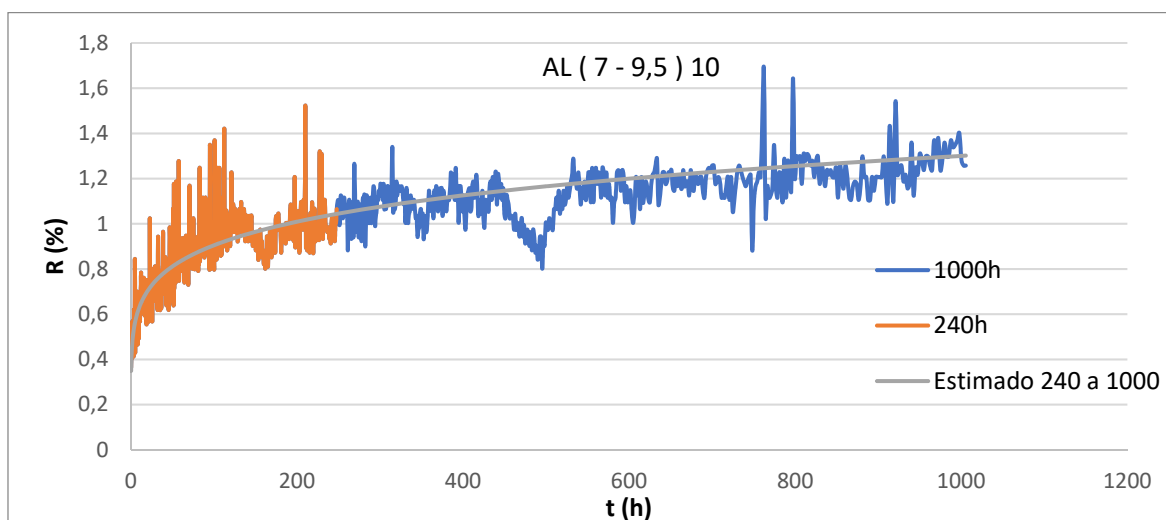


Gráfico 16: resultados en el ensayo de relajación en alambres lisos de 7 a 9,5 mm de diámetro.

En las 10 muestras que se han evaluado de alambres lisos con un diámetro que oscila entre 7 y 9,5 milímetros, los resultados que se han obtenido no distan mucho de las de sus homólogos de diámetro menor (alambres lisos entre 4 y 6 mm). En este caso, nuevamente, la mitad de las muestras mostraron unas estimaciones satisfactorias, mientras que el 50% restante mostró una sobrestimación del lado de la seguridad para valores de R dentro del rango +0,25% a +0,40% aproximadamente.

4.2 Resultados de los alambres grafilados

4.2.1 Alambres grafilados de diámetro 4 a 6 milímetros.

A continuación, se muestran los resultados de los alambres grafilados cuyos diámetros oscilan entre 4 y 5 milímetros y de los cuales se han podido obtener 5 muestras:

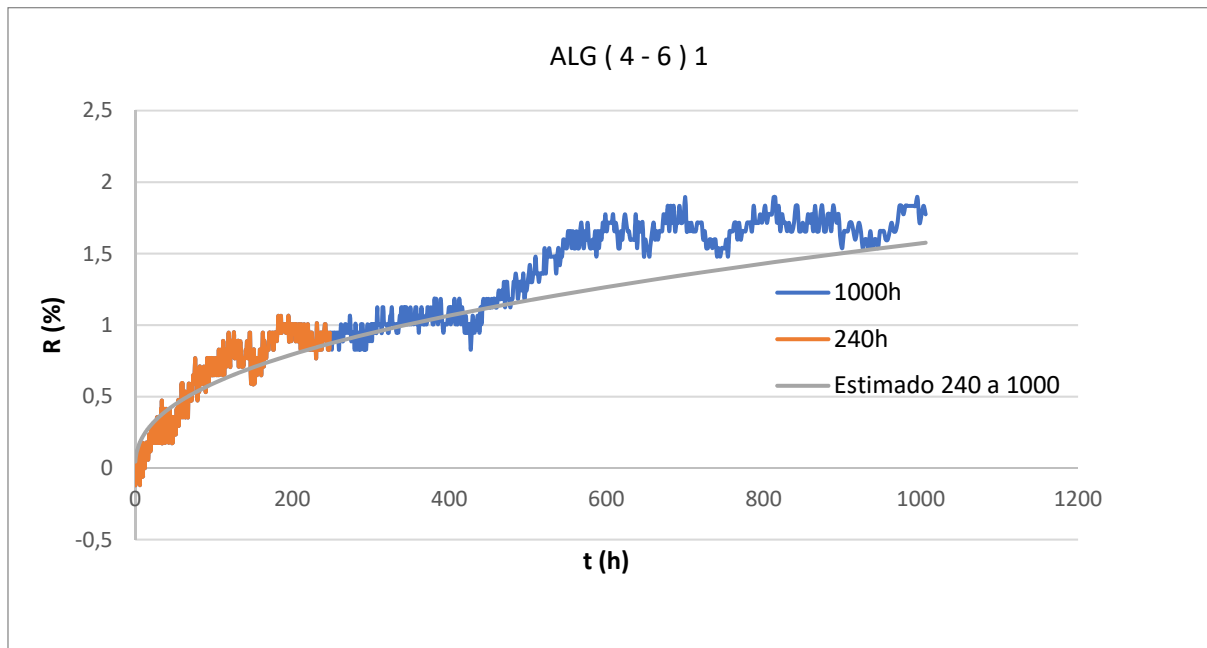


Gráfico 17: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 4-6 mm.

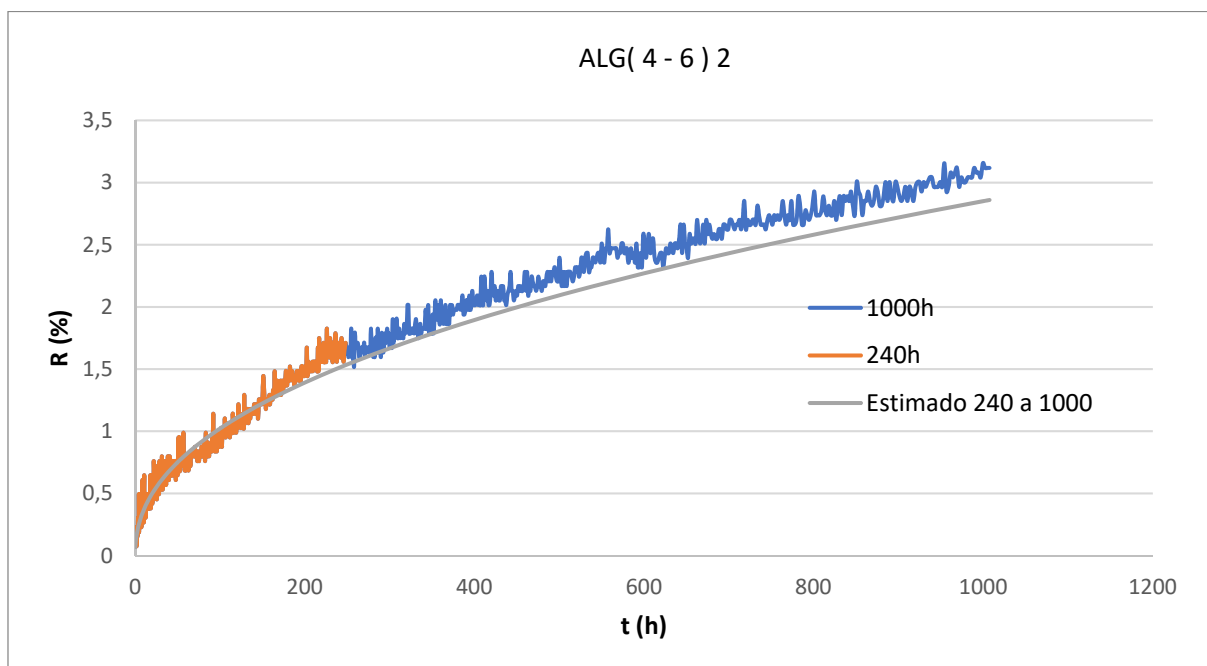


Gráfico 18: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 4-6 mm.

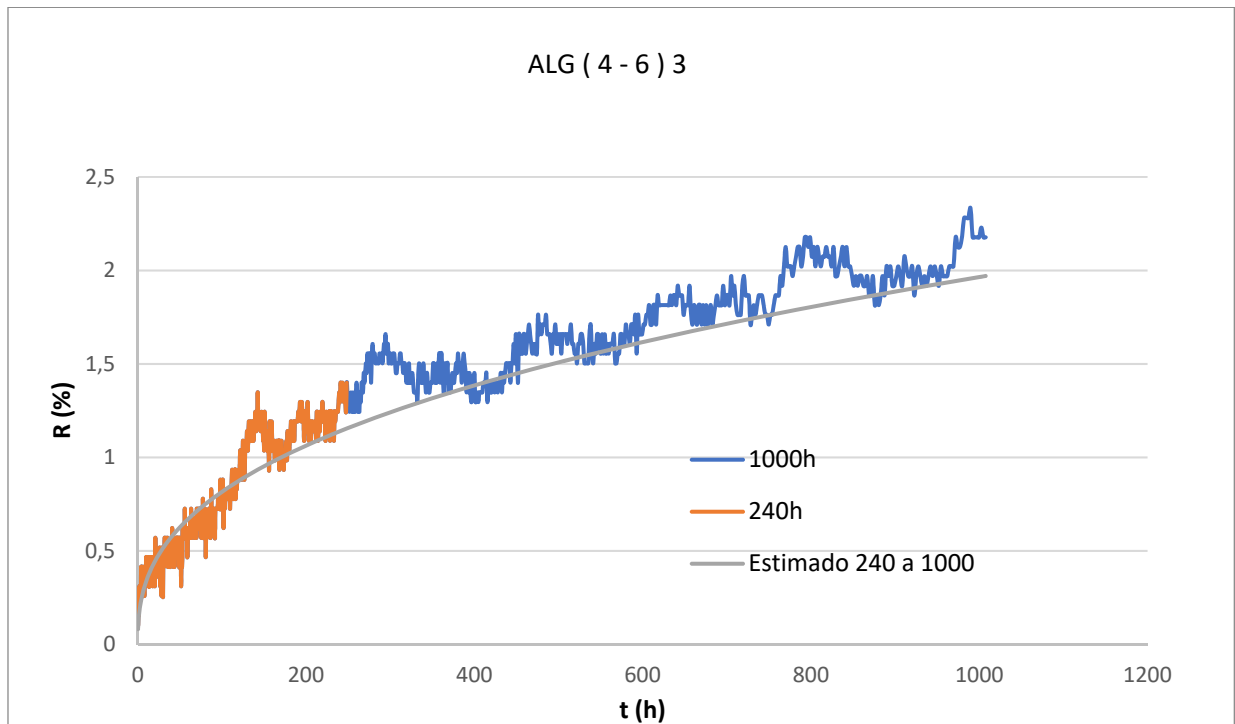


Gráfico 19: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 4-6 mm.

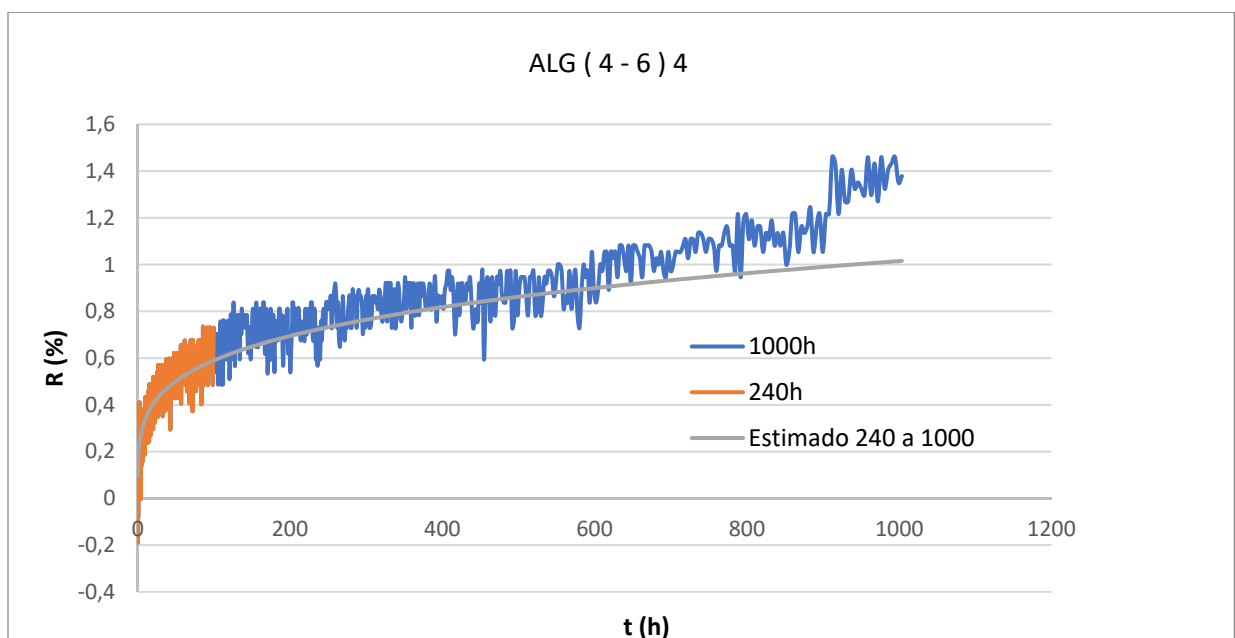


Gráfico 20: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 4-6 mm.

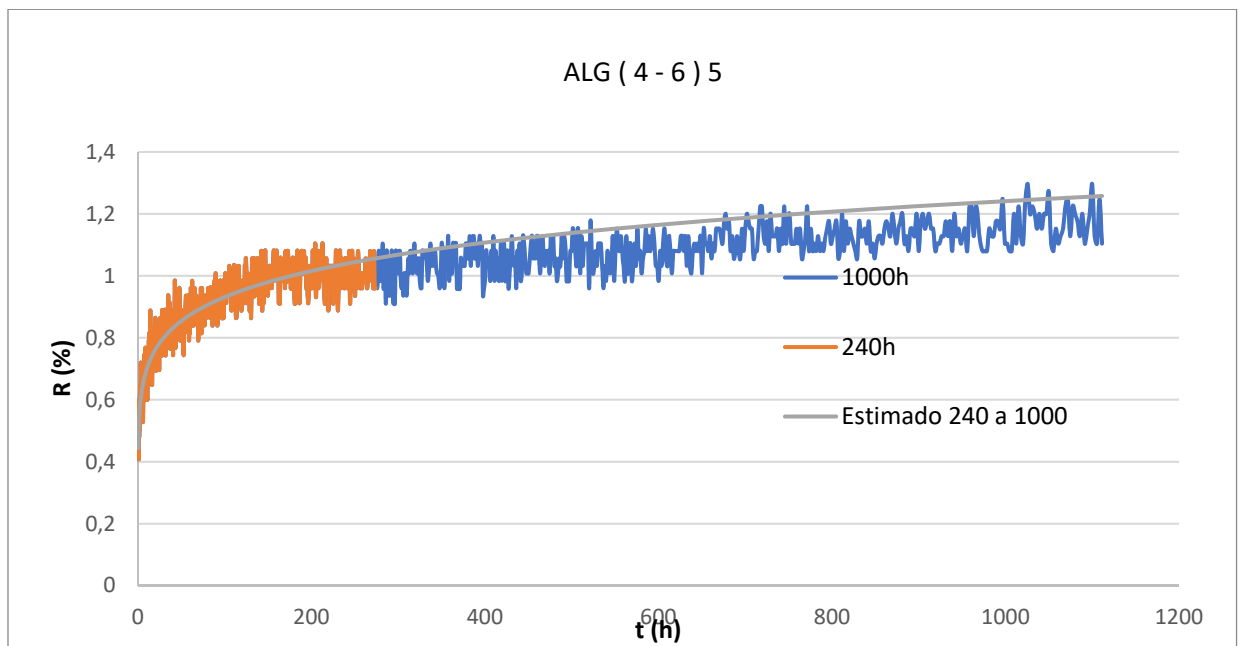
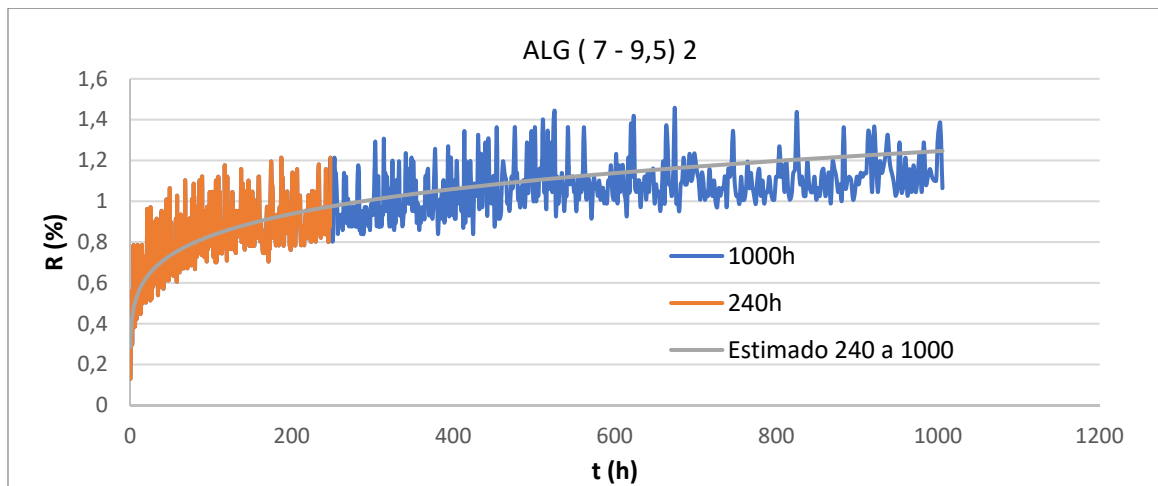
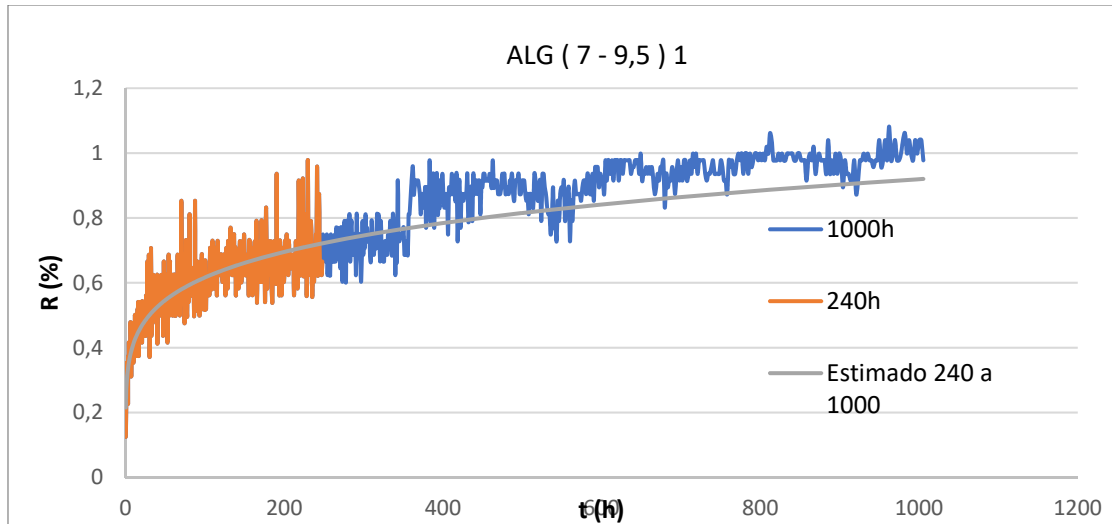


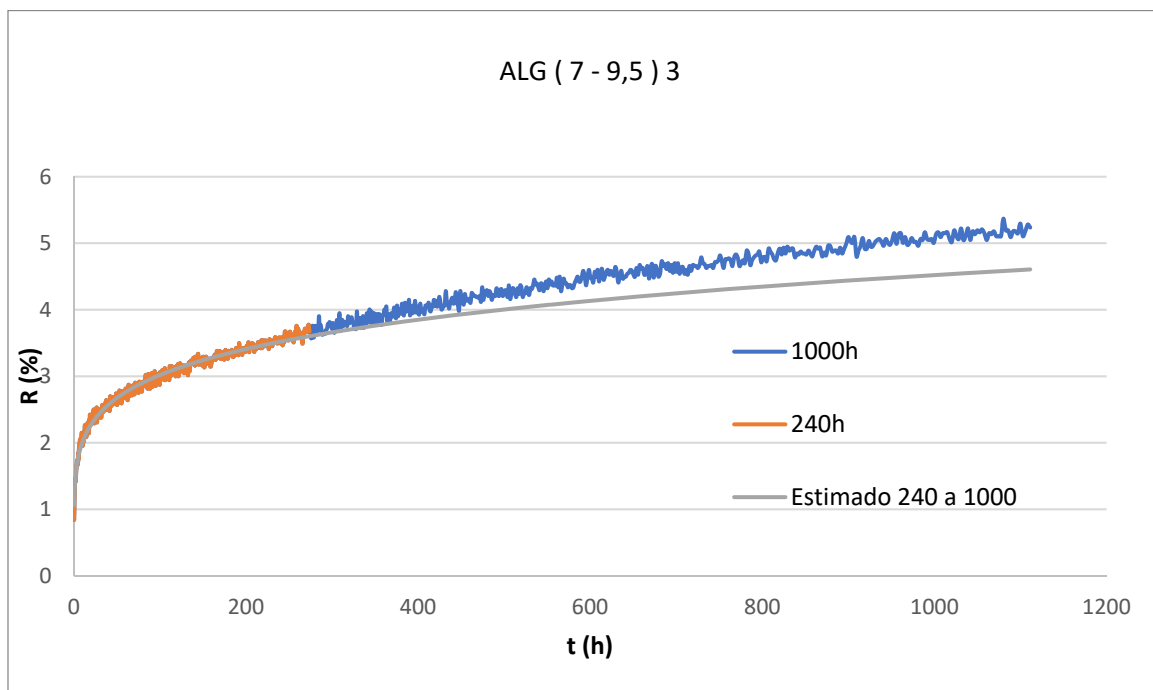
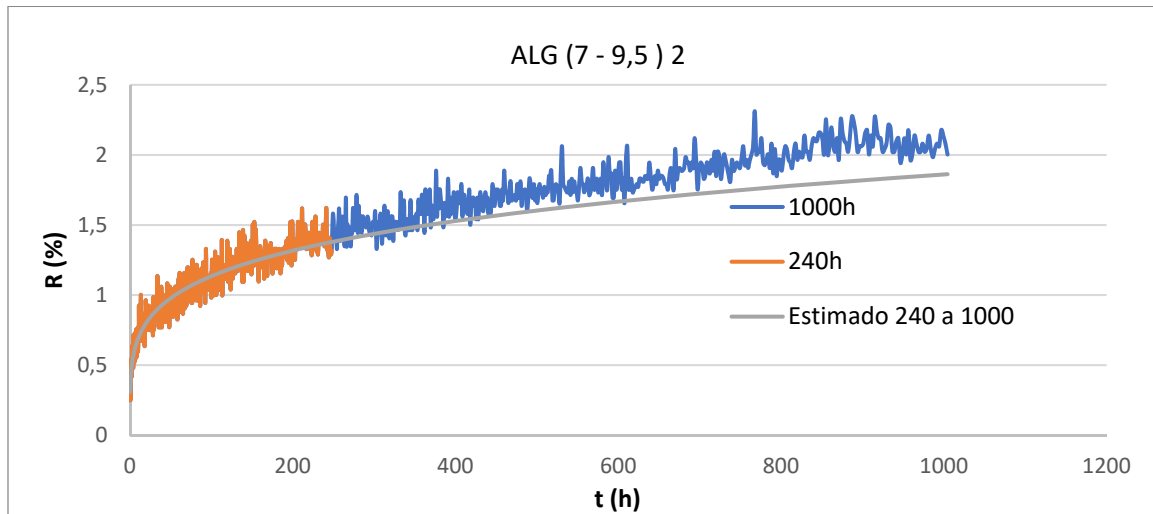
Gráfico 21: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 4-6 mm.

De las 5 muestras que se han evaluado de alambres grafilados con un diámetro que oscila entre 4 y 6 milímetros, bien es cierto que en todos los casos las estimaciones han mostrado una tendencia similar al comportamiento real, pero en todos los casos salvo en uno estas han estado del lado de la inseguridad. Es decir, que en el 80% de las situaciones los valores de relajación han sido subestimados en cuantías de $R=-0,2\%$ ó $R=0,3\%$, lo cual no es admisible por crear datos de cálculo que pueden caer en la inseguridad.

4.2.2 Alambres grafilados de diámetro 7 a 9,5 milímetros.

Para los alambres de 7, incluyendo también aquellos cuyo diámetro es de 7,5 y teniendo en cuenta que se han agrupado dichos alambres desde diámetro 7 hasta un diámetro de 9,5 tal y como quedo recogido durante el desarrollo del capítulo 3, se han dispuesto de muchos más ensayos, tanto de alambres lisos como grafilados, el número de muestras de que se han dispuesto para el desarrollo de este epígrafe, es decir, en los alambres grafilados es de 12, y su resultado se muestra a continuación:





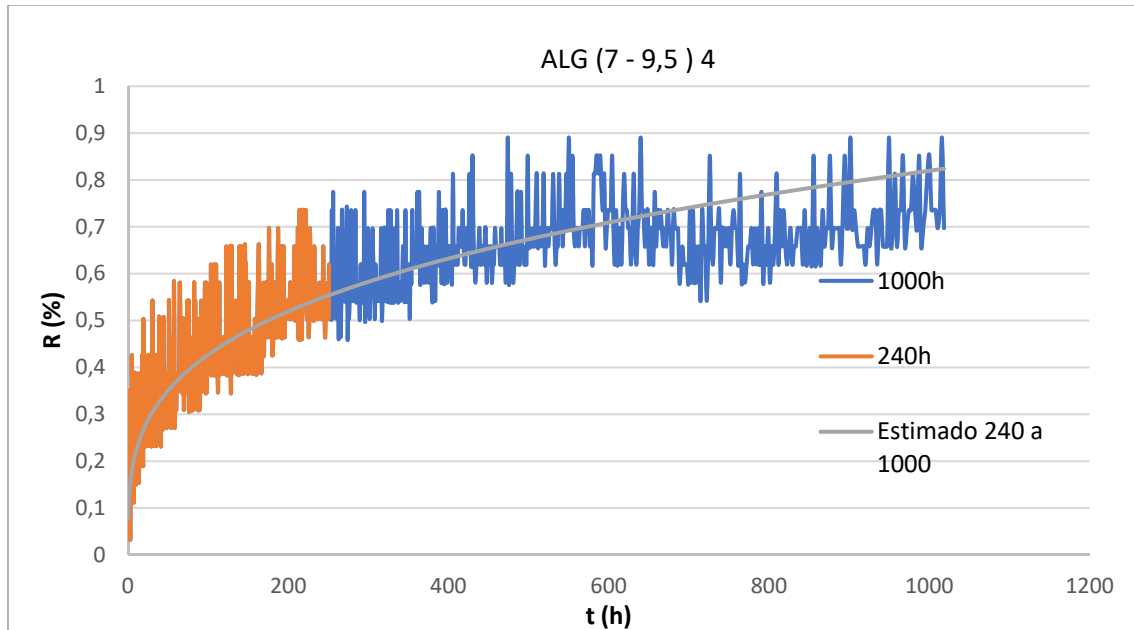


Gráfico 26: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

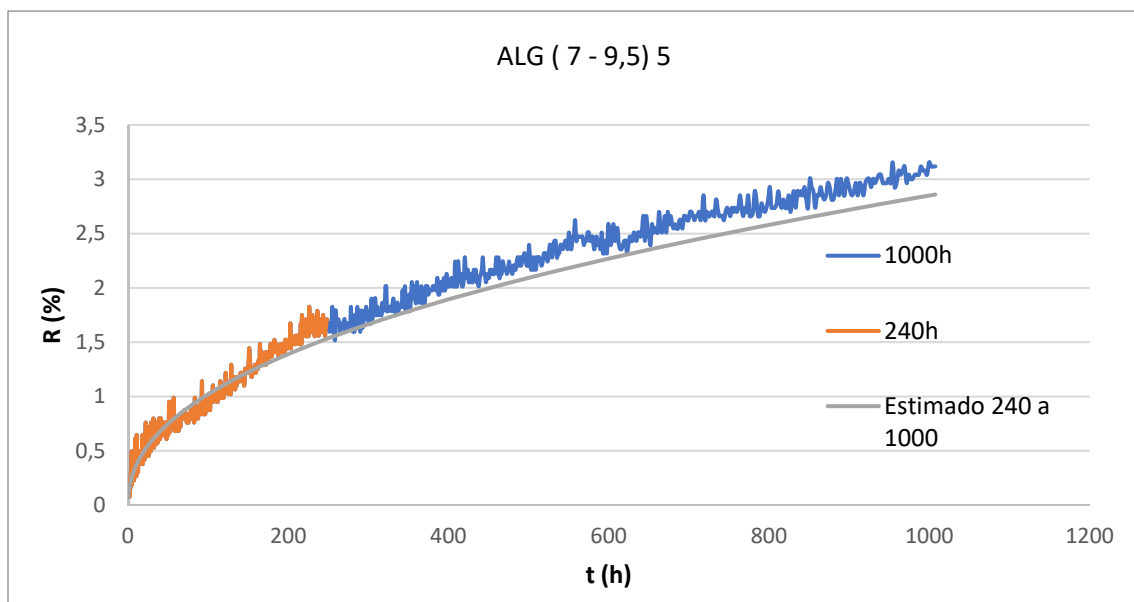


Gráfico 27: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

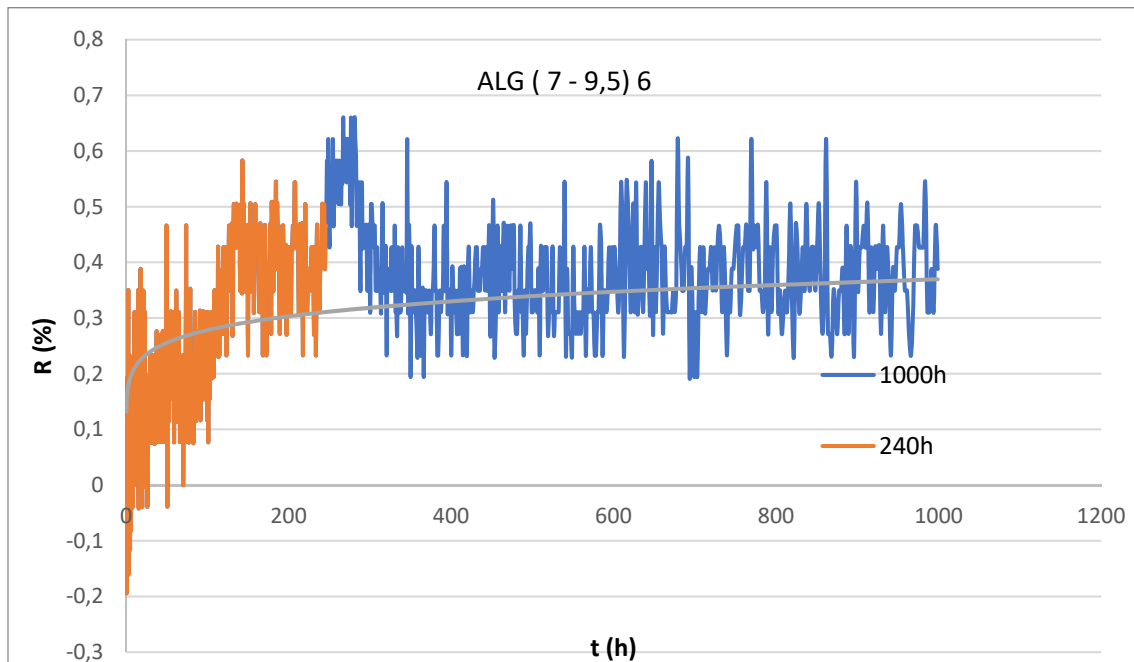


Gráfico 28: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

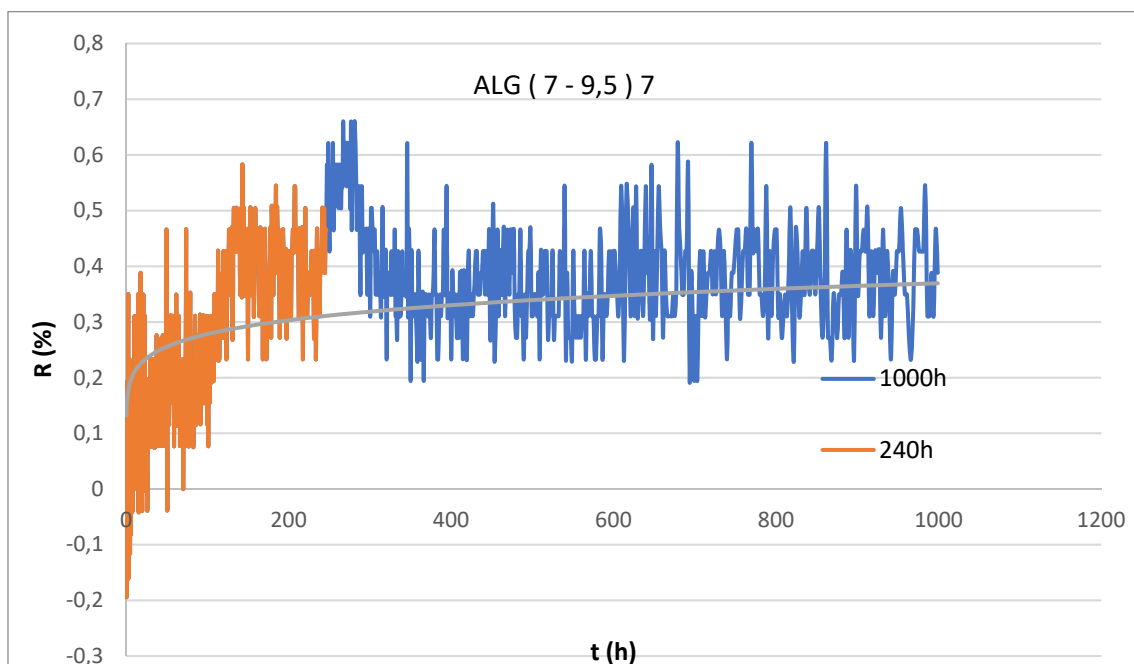


Gráfico 29: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

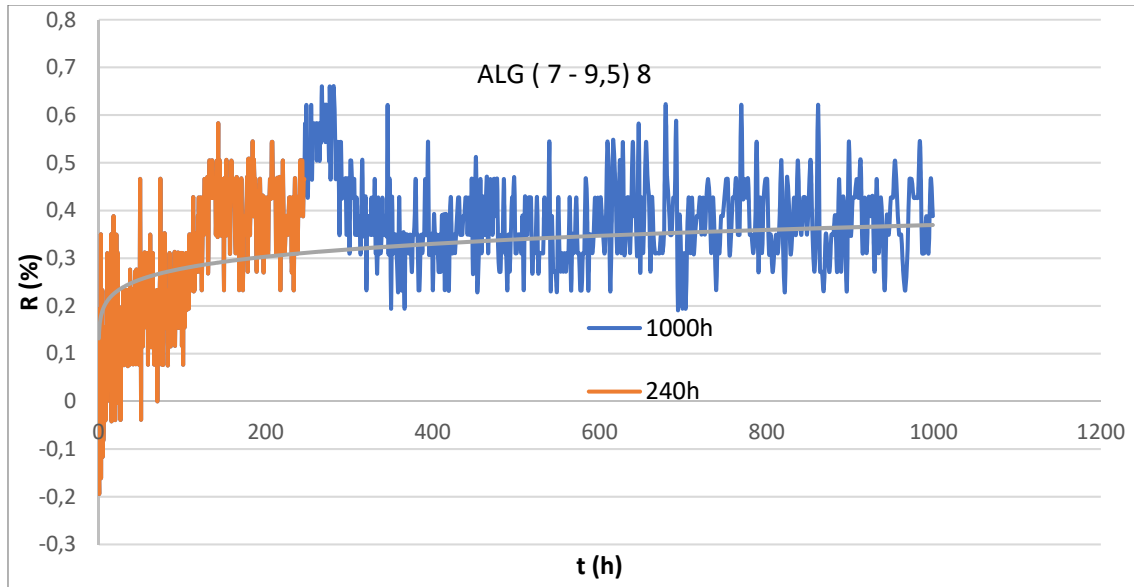


Gráfico 30: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

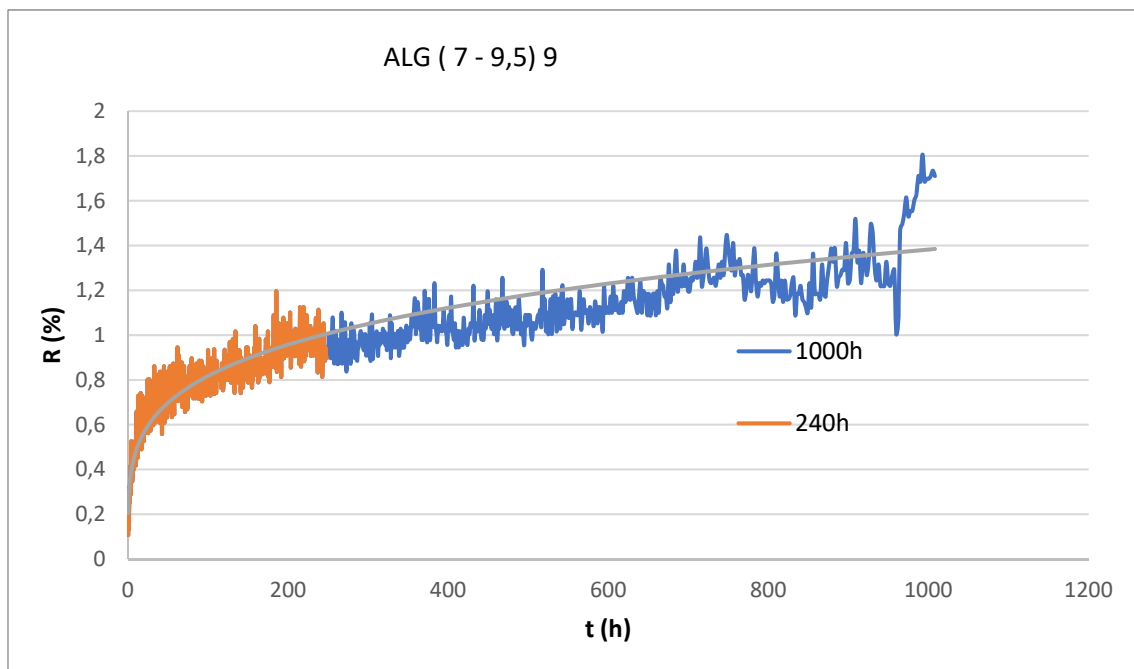


Gráfico 31: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

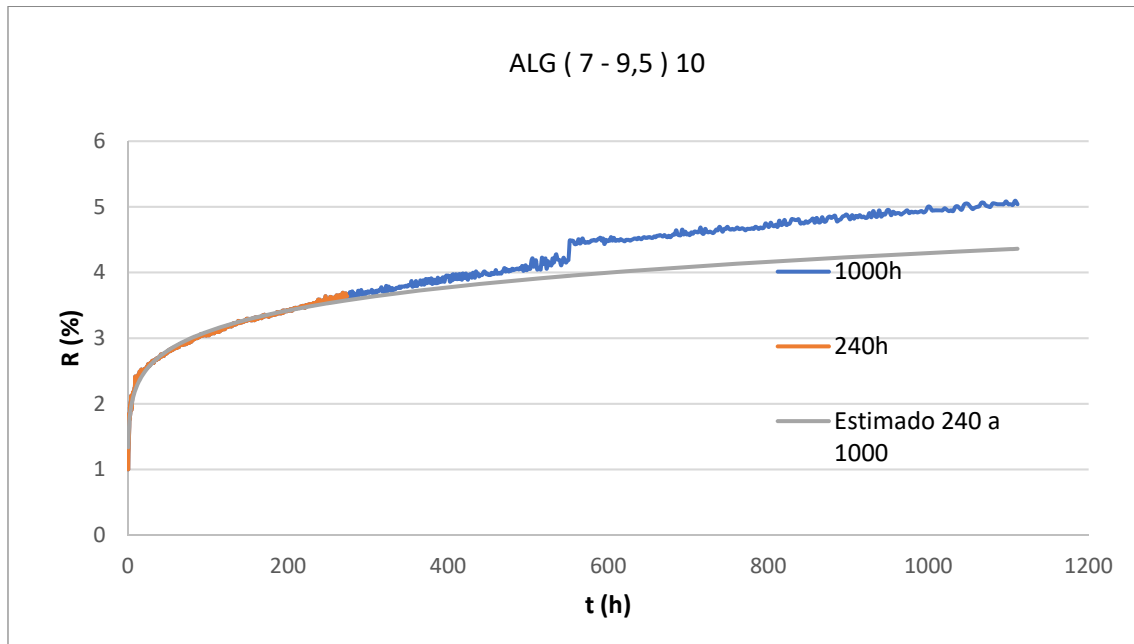


Gráfico 32: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

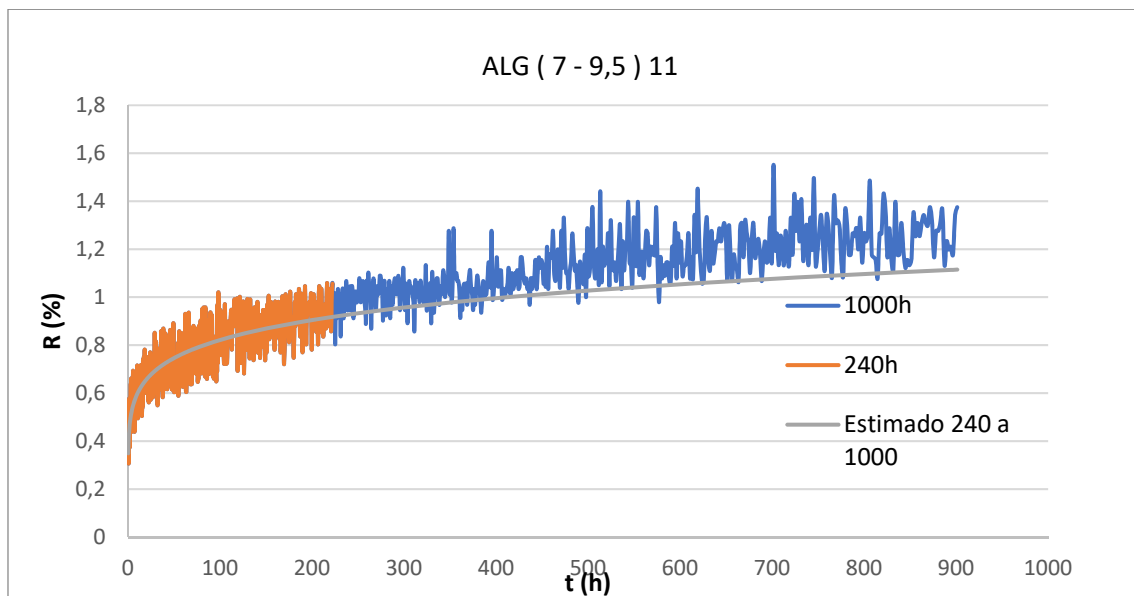


Gráfico 33: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

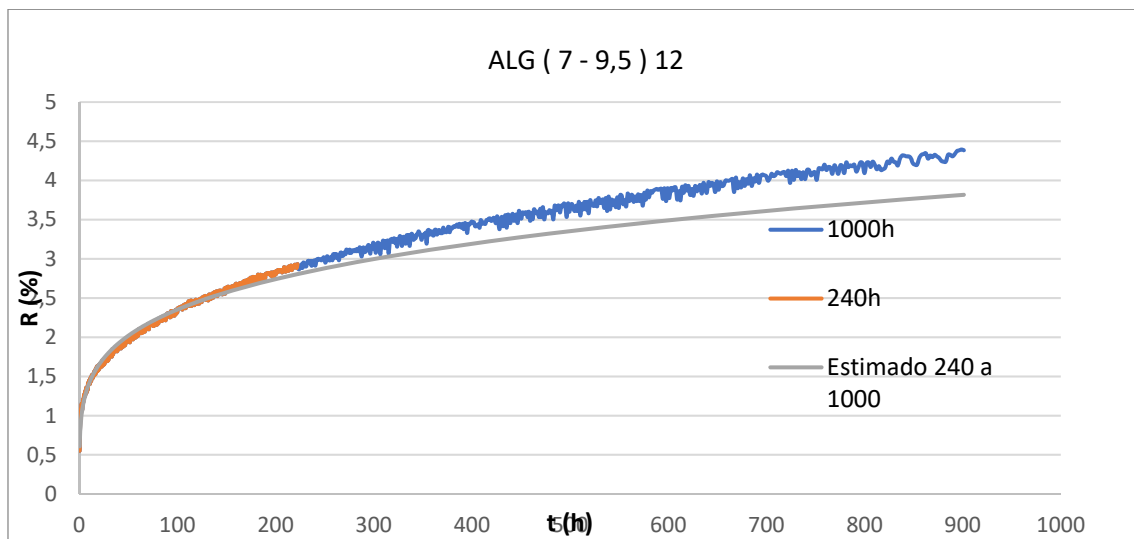


Gráfico 34: resultados en el ensayo de relajación en alambres grafilados de 7 a 9,5 mm de diámetro.

Aproximadamente en la mitad de las 13 muestras que se han evaluado, de alambres grafilados con un diámetro que oscila entre 7 y 9,5 milímetros, los resultados que se han obtenido es que la estimación es correcta o ligeramente del lado de la seguridad. Sin embargo, en aproximadamente el otro 50%, la estimación queda con valores de R por debajo de la curva real del ensayo de relajación, es decir, que se producen unas subestimaciones del parámetro de relajación del lado de la inseguridad con valores comprendidos entre $R=-0,15\%$ y $R=-0,30\%$ aproximadamente.

4.3 Resultados de los cordones

Para poder obtener una agrupación o más bien, un conjunto de muestras que sea representativa como para poder obtener unas conclusiones sólidas y teniendo en cuenta, las agrupaciones que se establecieron en el capítulo 3 del presente documento, agruparemos los cordones únicamente en función del tamaño de su diámetro ya que todas las muestras que han sido extraídas, se trata de cordones formados por 7 alambres y cuyas características geométricas y físicas ya fueron detalladas durante el desarrollo del capítulo 2.



Por lo tanto, en lo referente a los resultados de los cordones, serán separados en 2 grandes grupos en función de su diámetro, por un lado el grupo de cordones cuya dimensión diametral oscila entre 15 y 16 milímetros y por otro lado, tendremos el grupo de cordones conformado por aquellos que tengan un diámetro que oscile entre 12,5 y 13 milímetros.

4.3.2 Cordones formados por 7 alambres de entre 12,5 y 13 milímetros de diámetro.

En lo referente a los cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13, cuyos gráficos muestro a continuación, los resultados obtenidos son similares a los ya expuestos en en anterior epigrafe de los cordones de entre 15 y 16 milímetros.

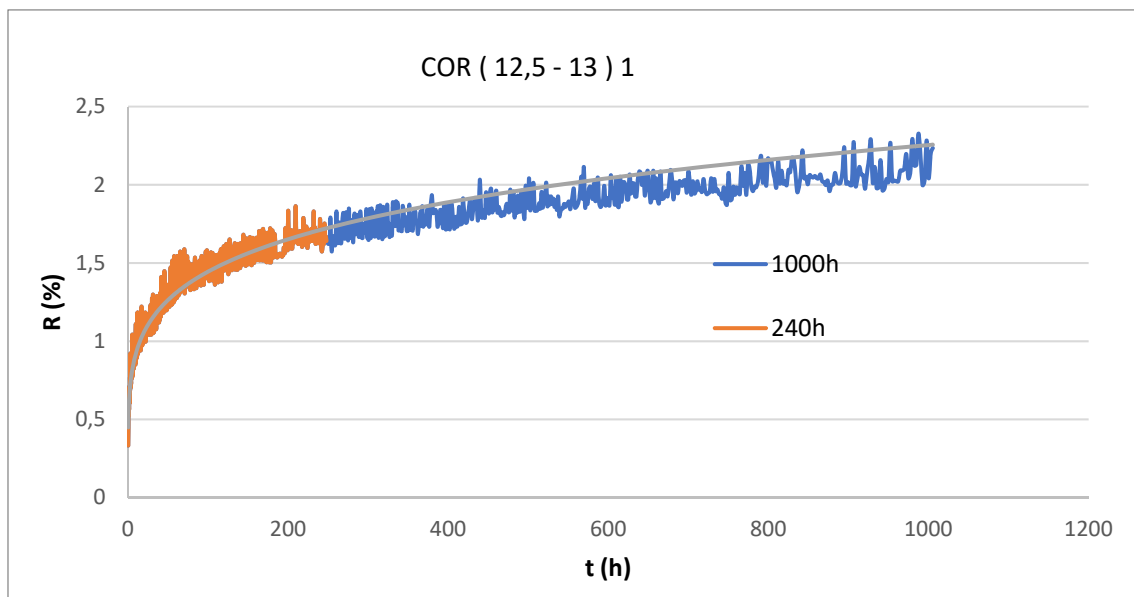


Gráfico 35: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

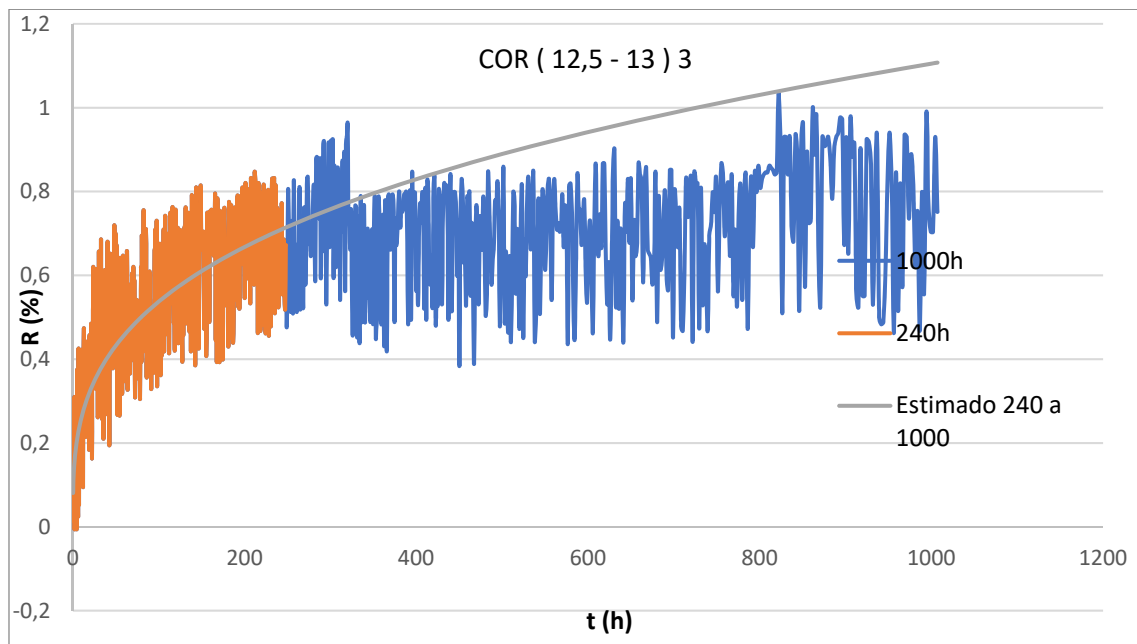


Gráfico 36: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

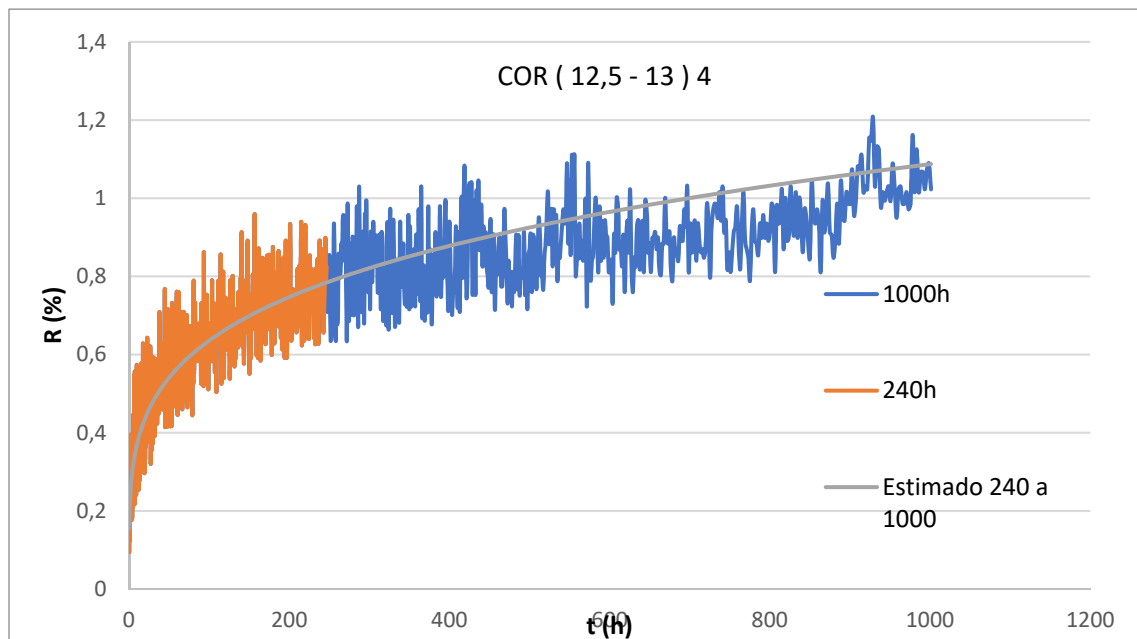


Gráfico 37: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

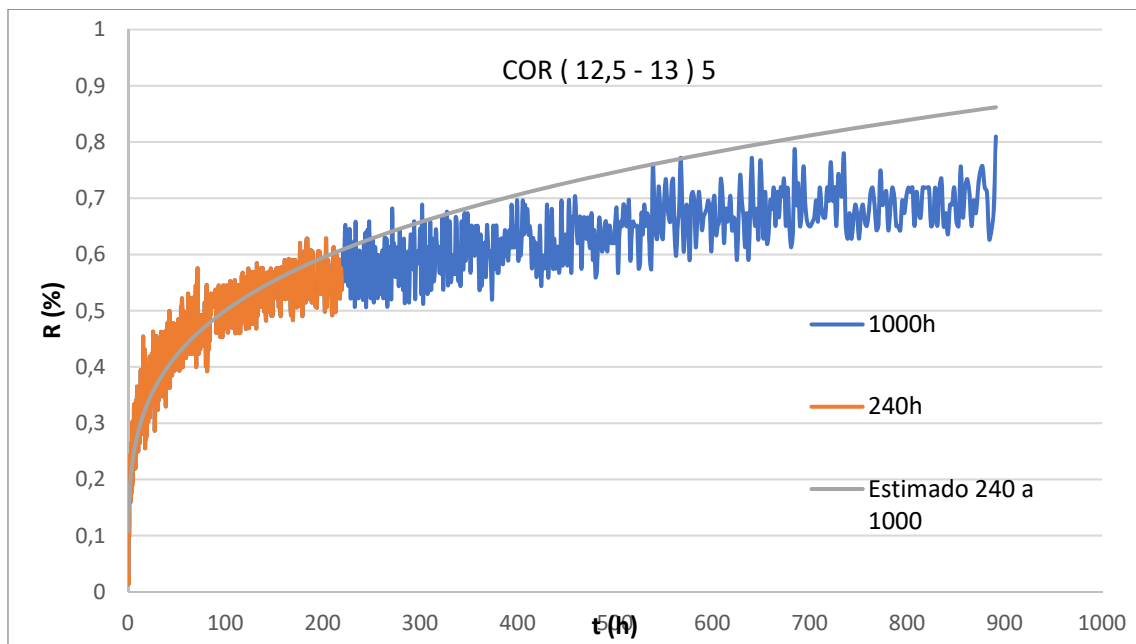


Gráfico 38: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

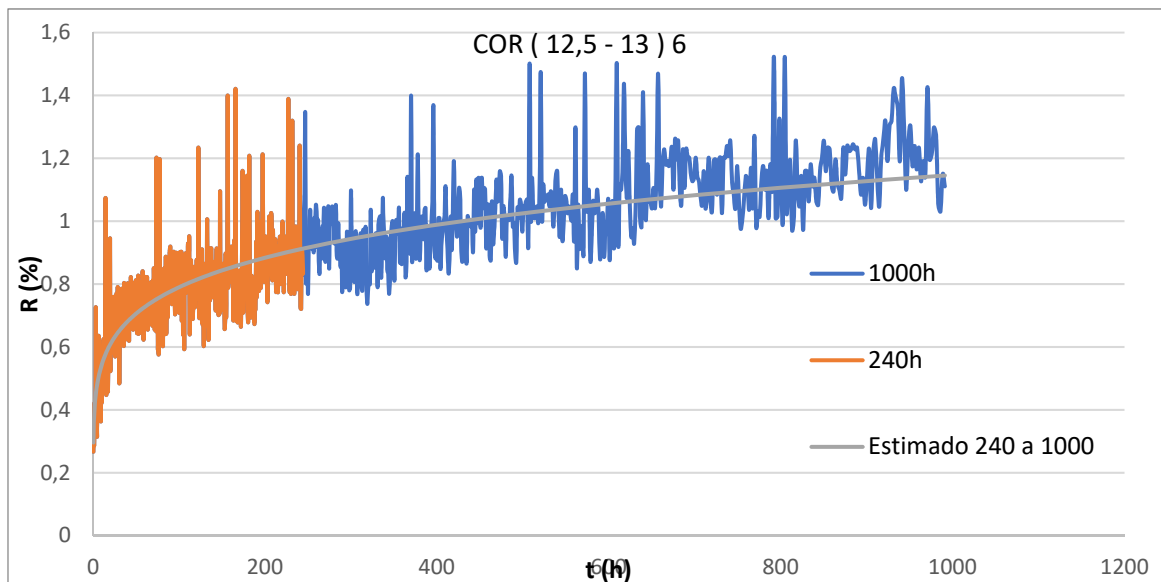


Gráfico 39: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

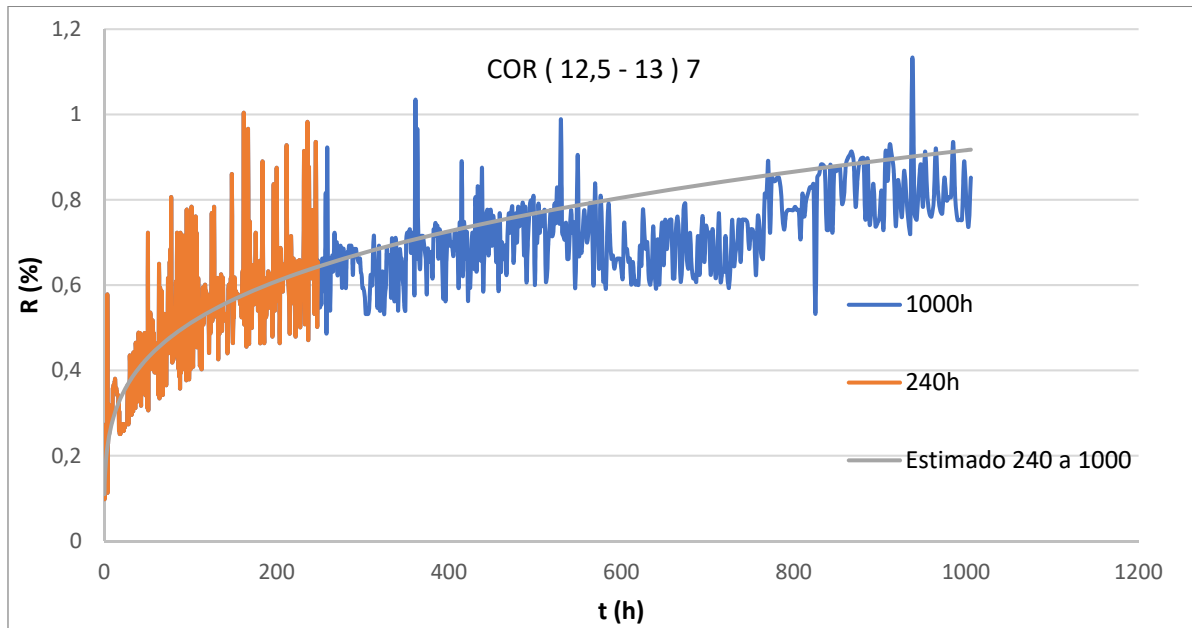


Gráfico 40: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

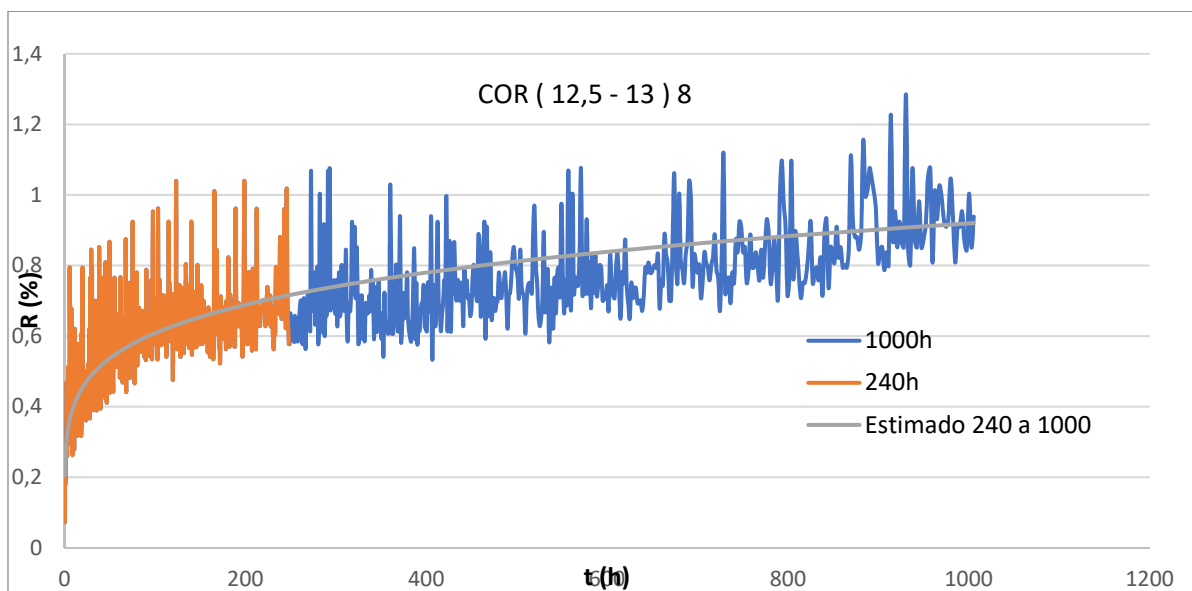


Gráfico 41: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

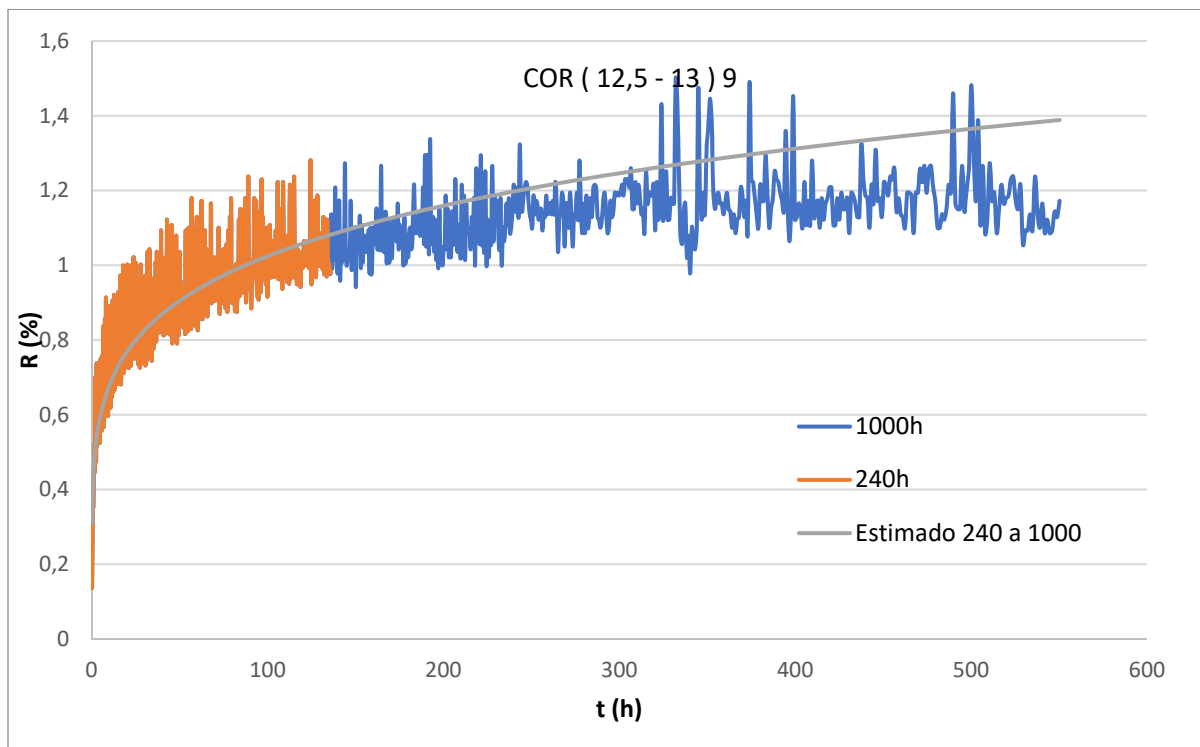


Gráfico 42: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

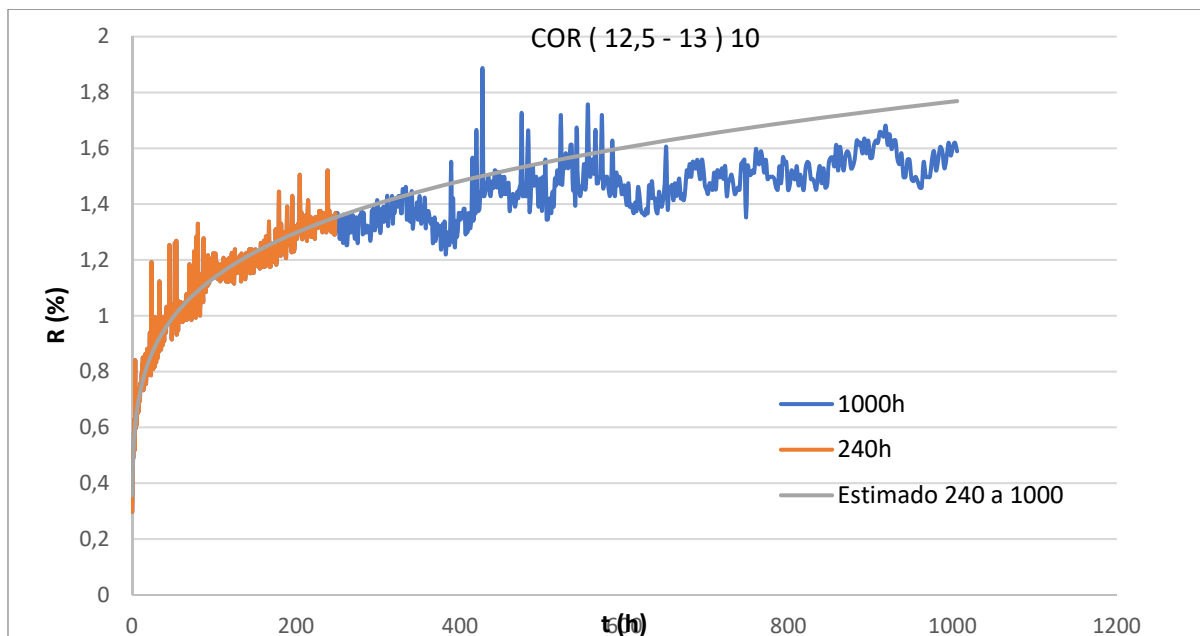


Gráfico 43: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

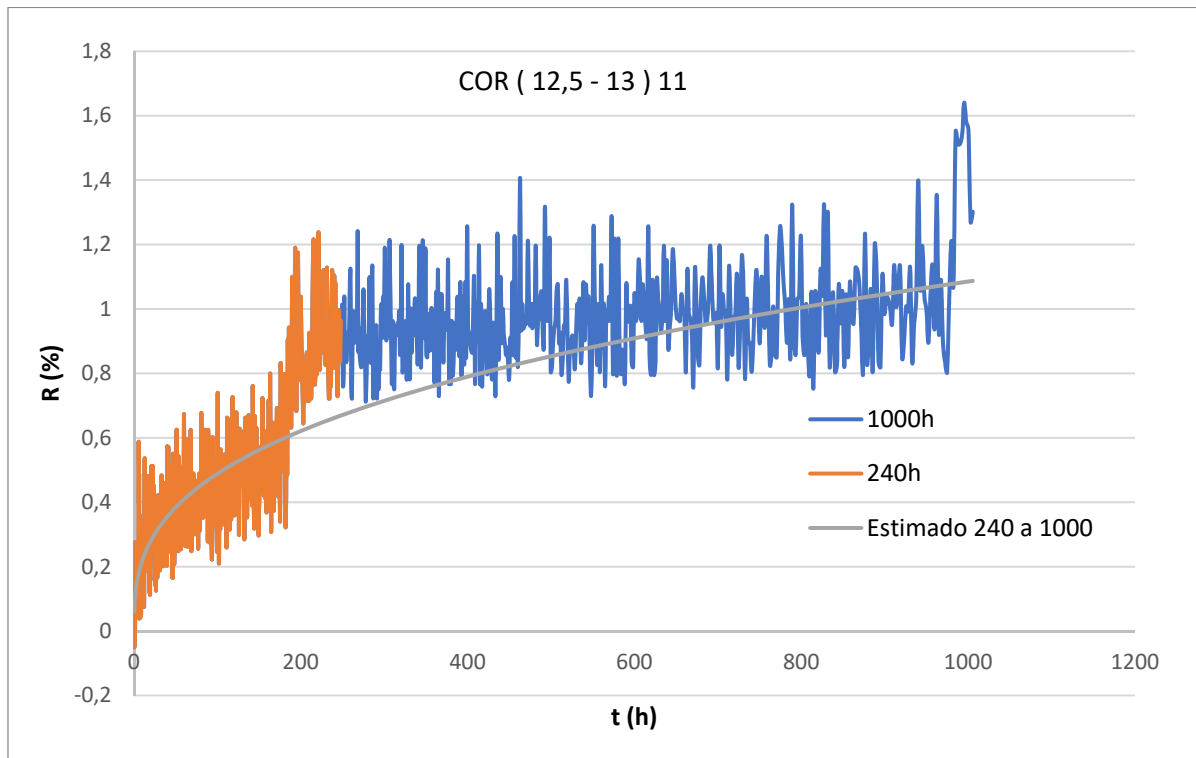


Gráfico 44: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

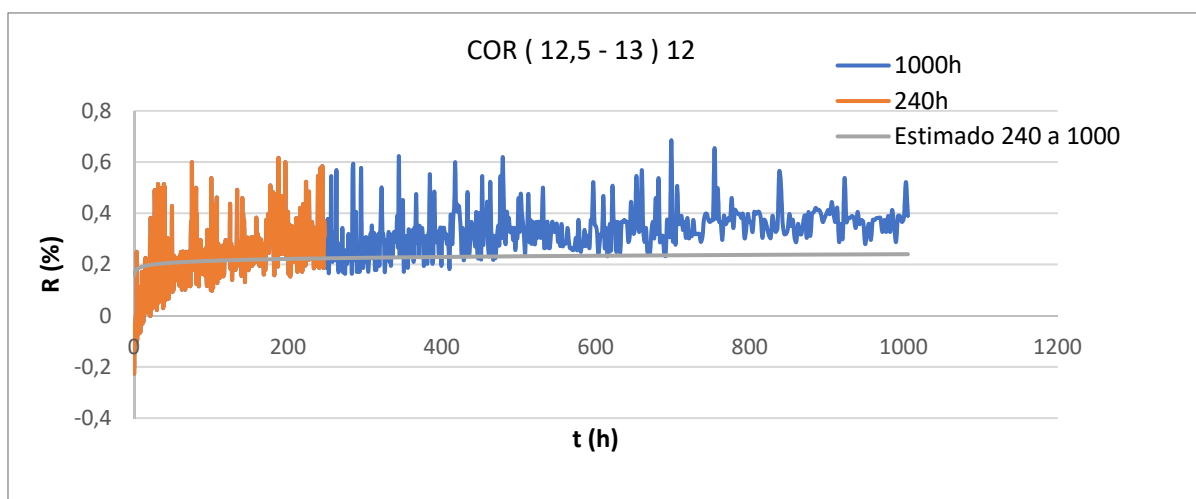


Gráfico 45: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

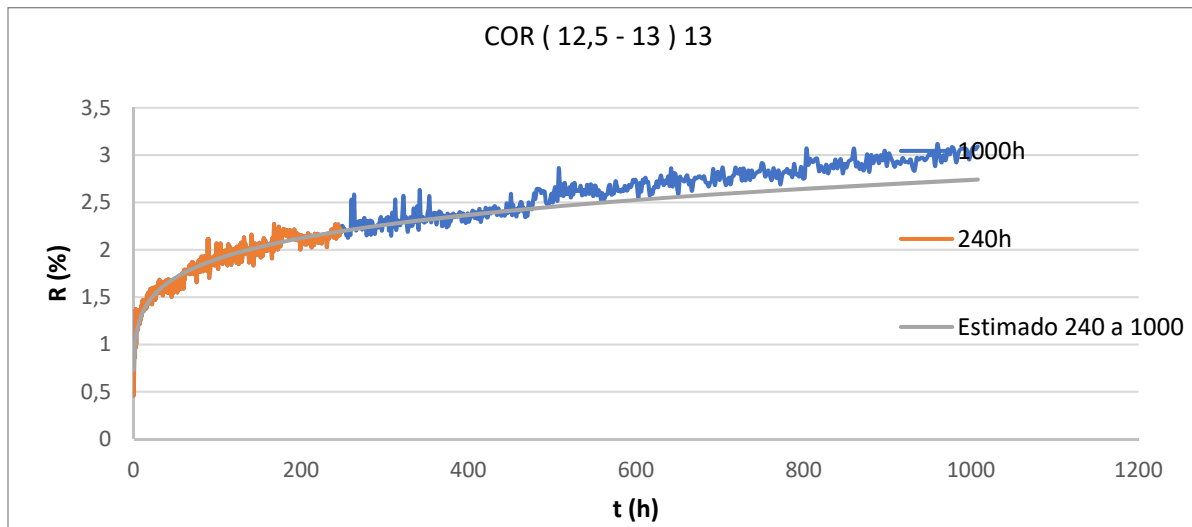


Gráfico 46: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

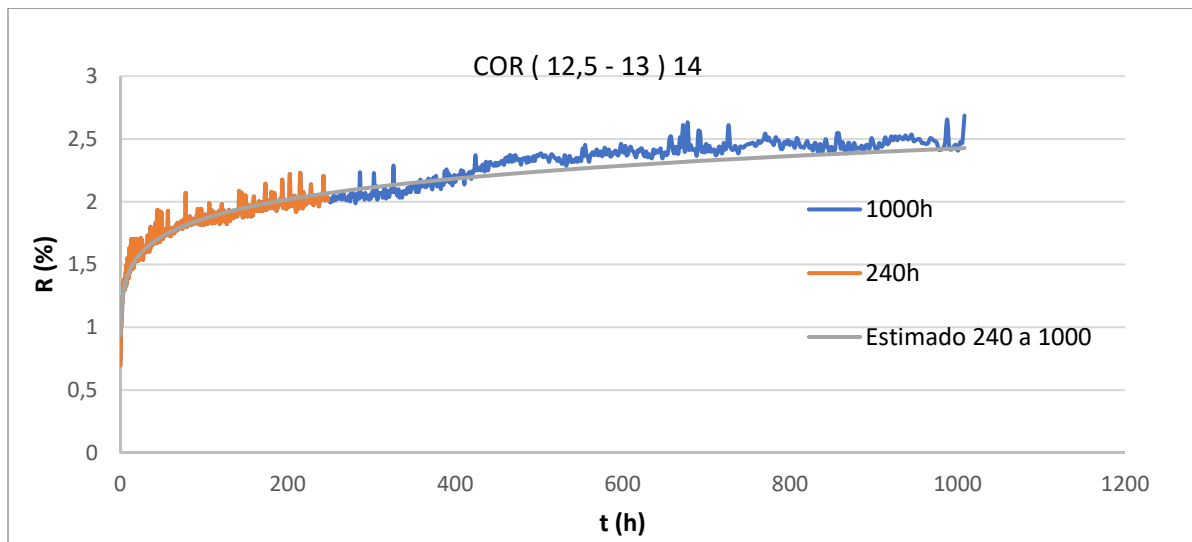


Gráfico 47: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

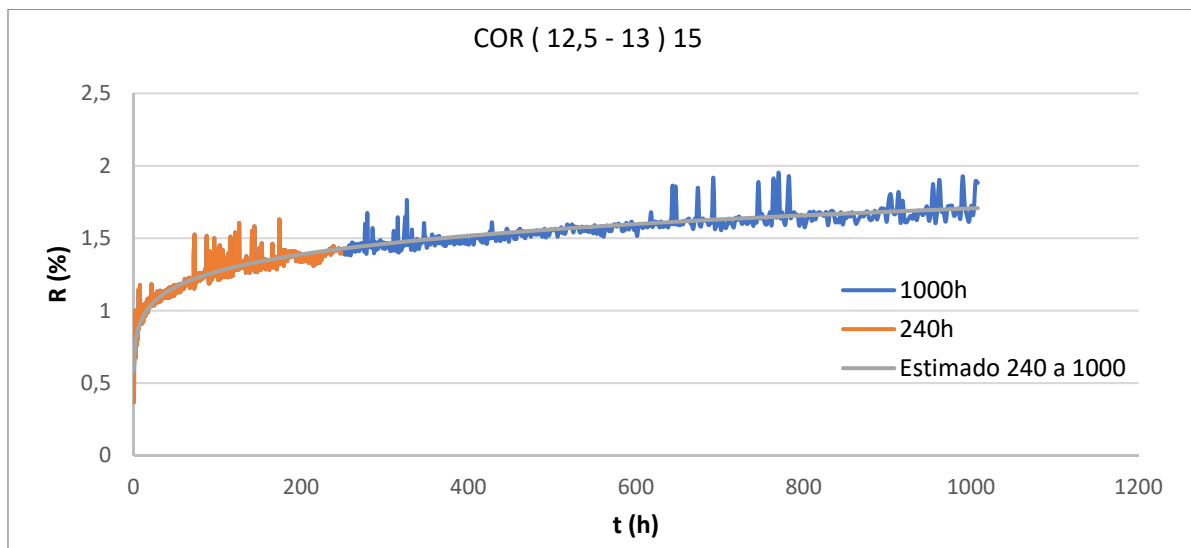


Gráfico 48: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 12,5 y 13 milímetros.

Para el caso de los cordones de 7 alambres de diámetro entre 12,5 y 13 milímetros, en aproximadamente el 50% de las ocasiones las estimaciones han sido satisfactorias y con un grado de ajuste a la realidad suficiente. Sin embargo, en la otra mitad de los ensayos se han observado dos efectos diferentes: por un lado, en un 40% de ellos aproximadamente los valores de R estimados han estado entre +0,2% y +0,3% por encima, quedando del lado de la seguridad; en el 10% de los ensayos restantes la extrapolación de 240h hasta 1000h ha arrojado valores del lado de la inseguridad, con valores entre $R=-0,1\%$ y $R=-0,50\%$. Este hecho implica que en este tipo de geometría la extrapolación tiene una peligrosa dispersión en ambos sentidos.

4.3.1 Cordones formados por 7 alambres de entre 15 y 16 milímetros de diámetro.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros, cuya agrupación viene recogida en el capítulo 3, más concretamente en la parte de la metodología, de este documento.

Se dispone de un total de 32 muestras de cordones cuyo diámetro oscila entorno a los milímetros ya mencionados.

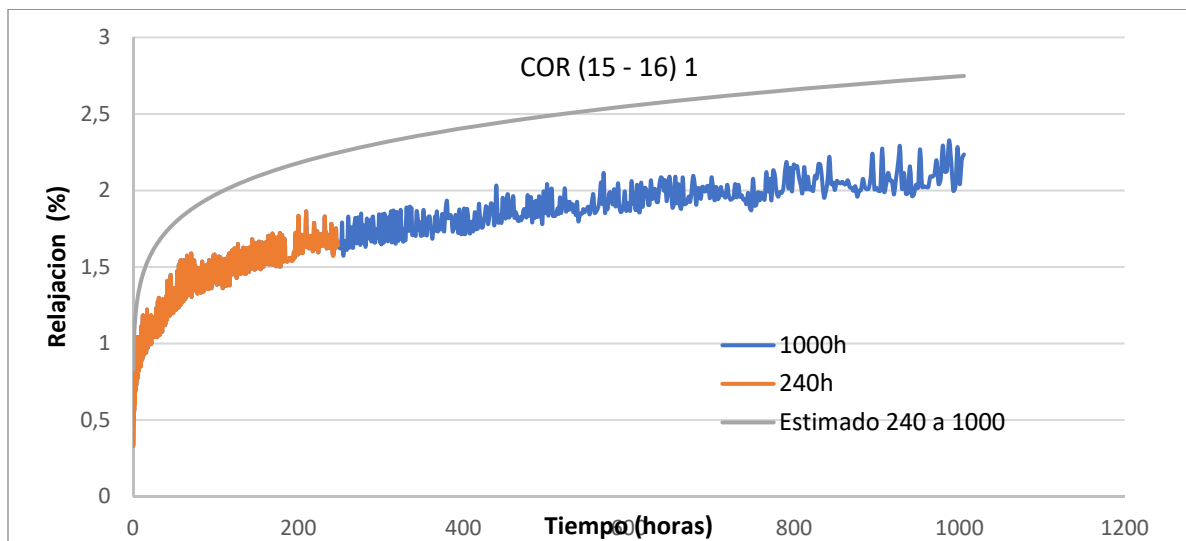


Gráfico 49: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

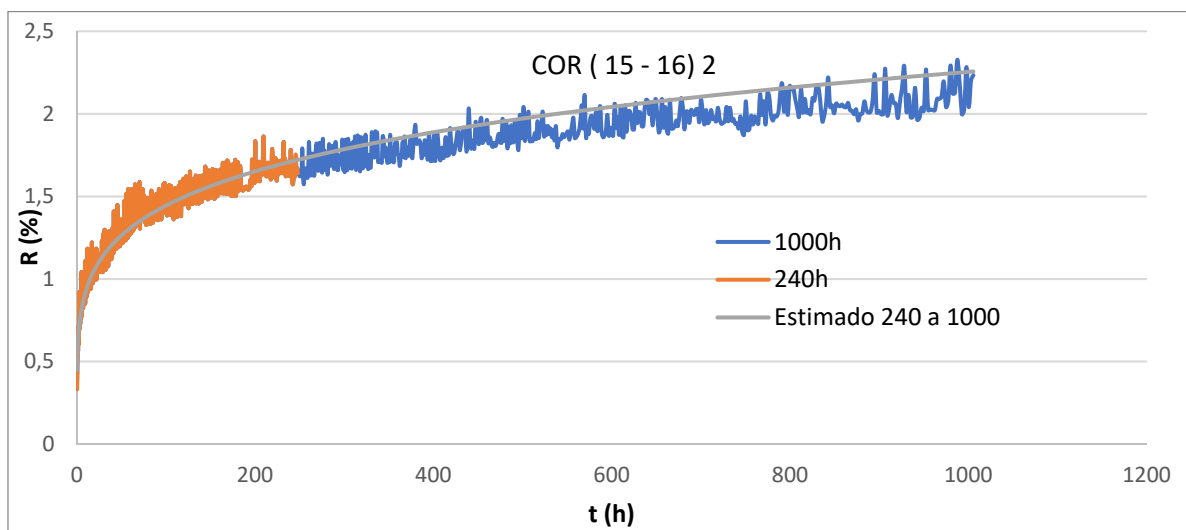


Gráfico 50: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

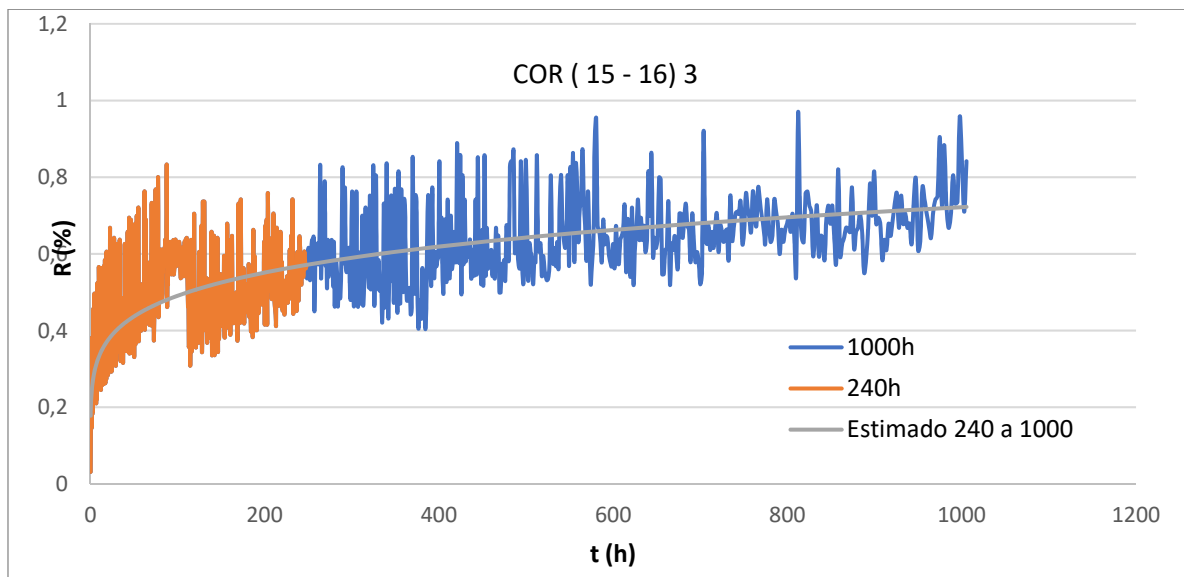


Gráfico 51: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

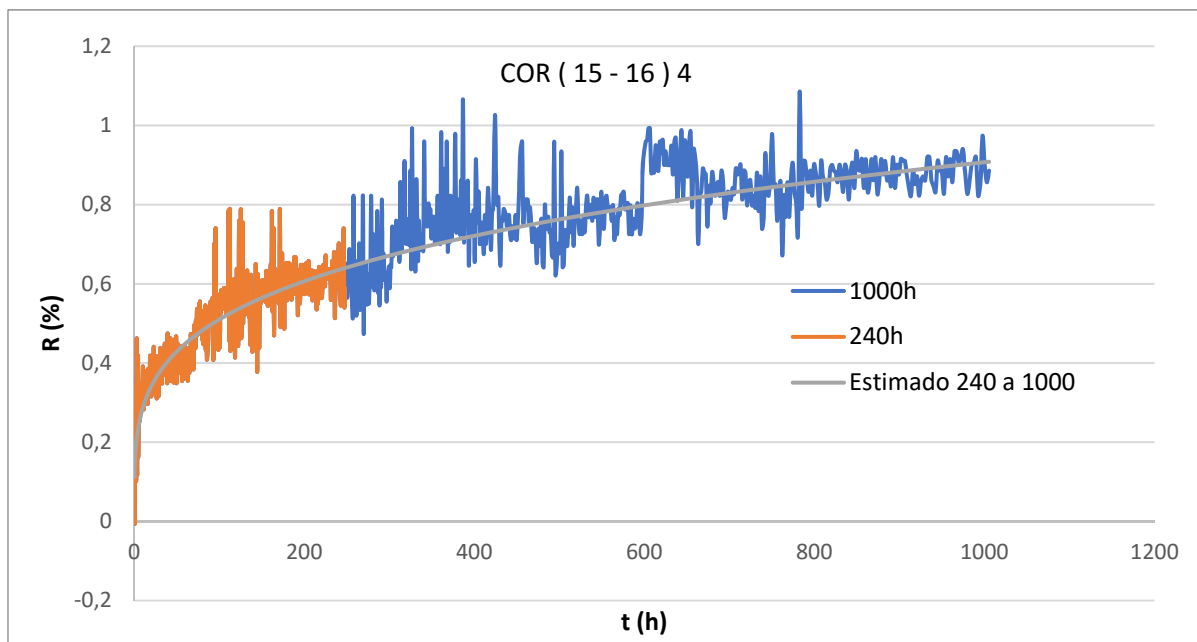


Gráfico 52: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

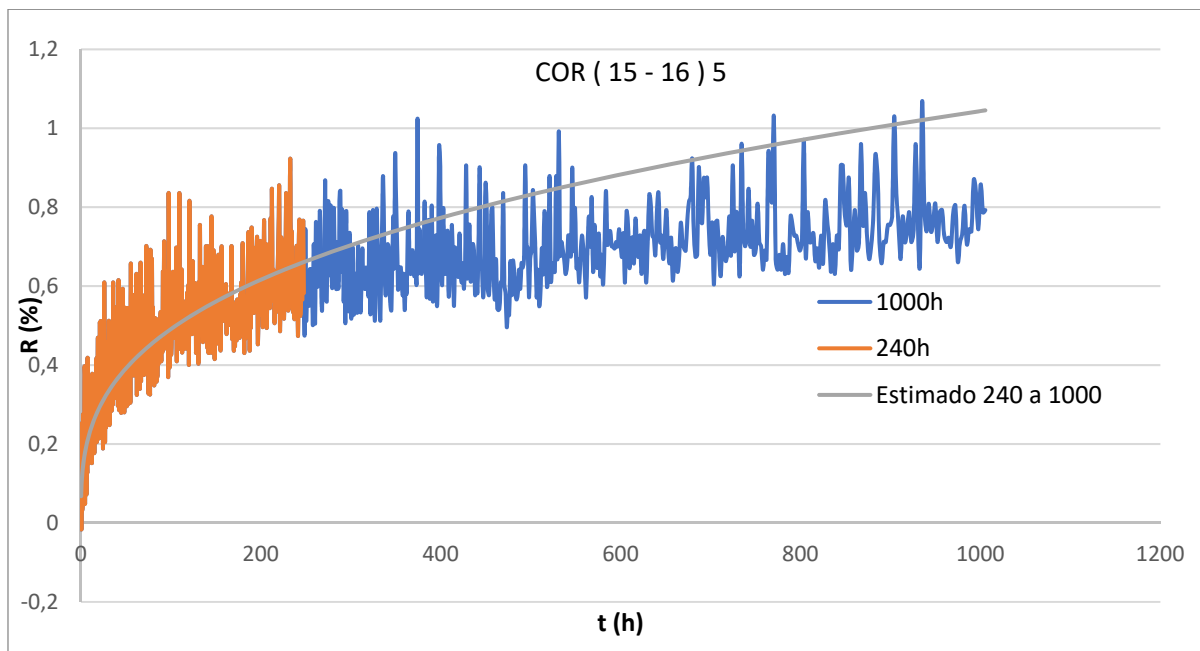


Gráfico 53: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

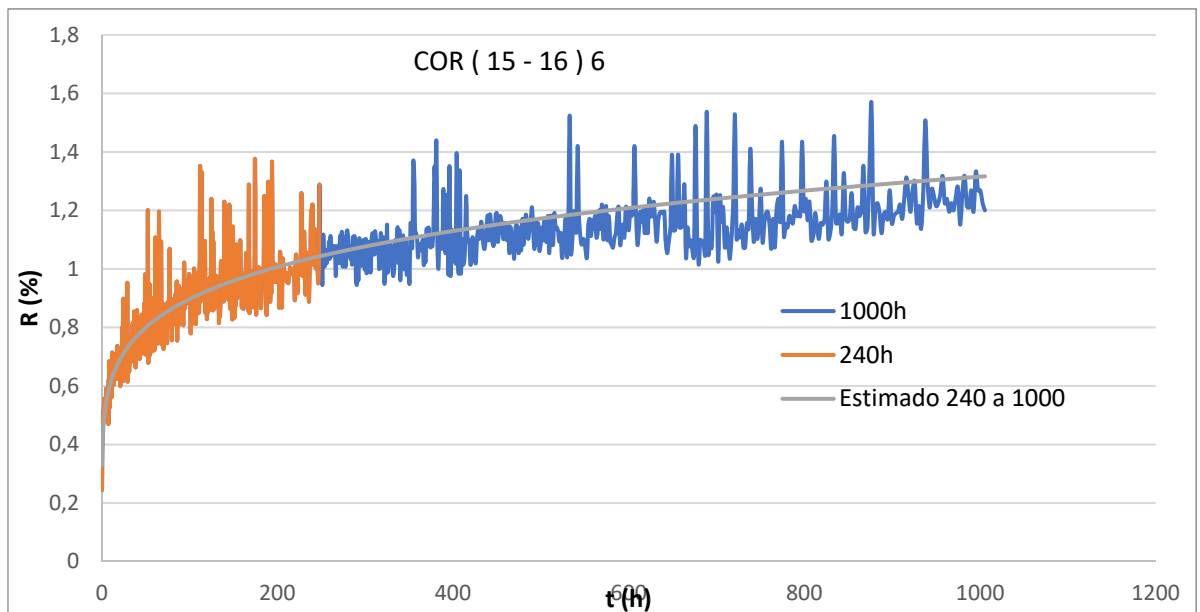


Gráfico 54: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

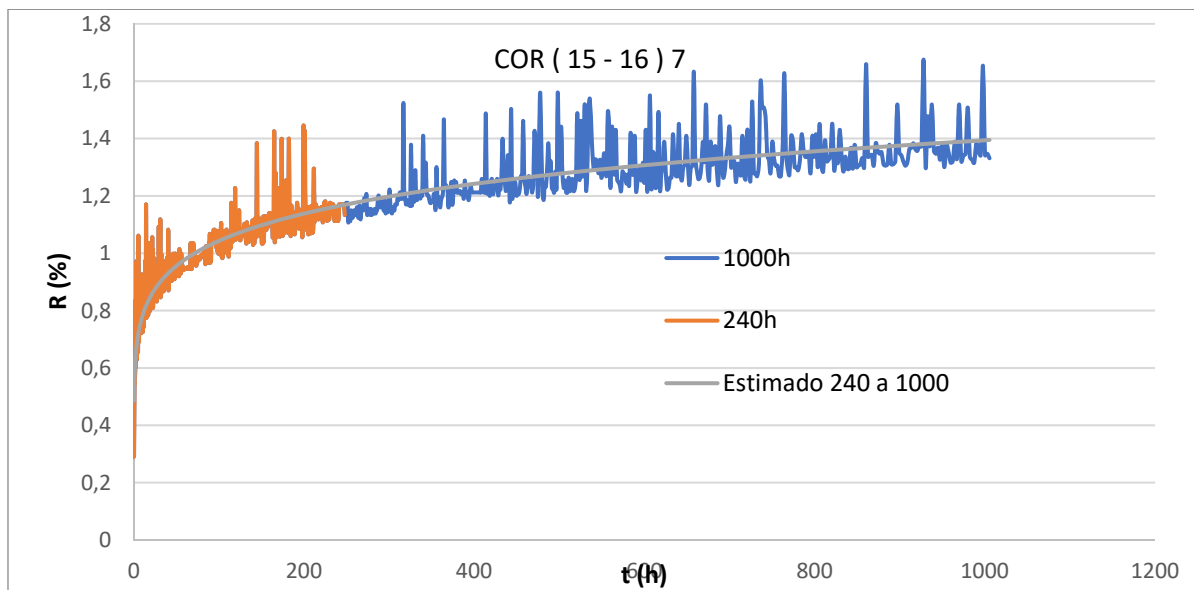


Gráfico 55: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

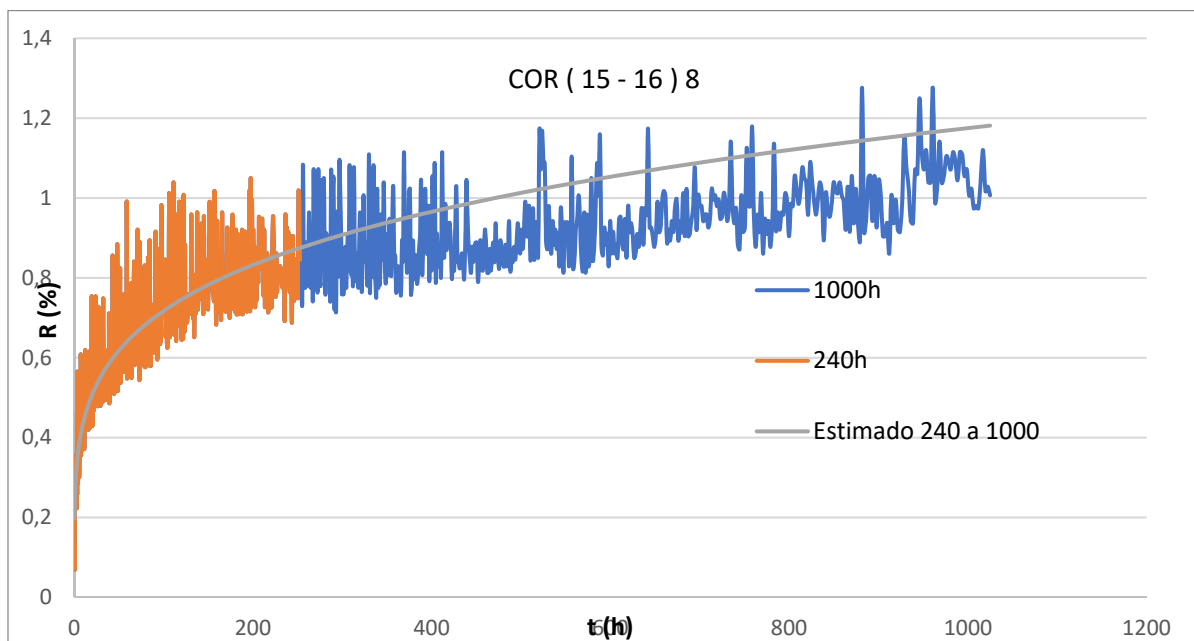


Gráfico 56: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

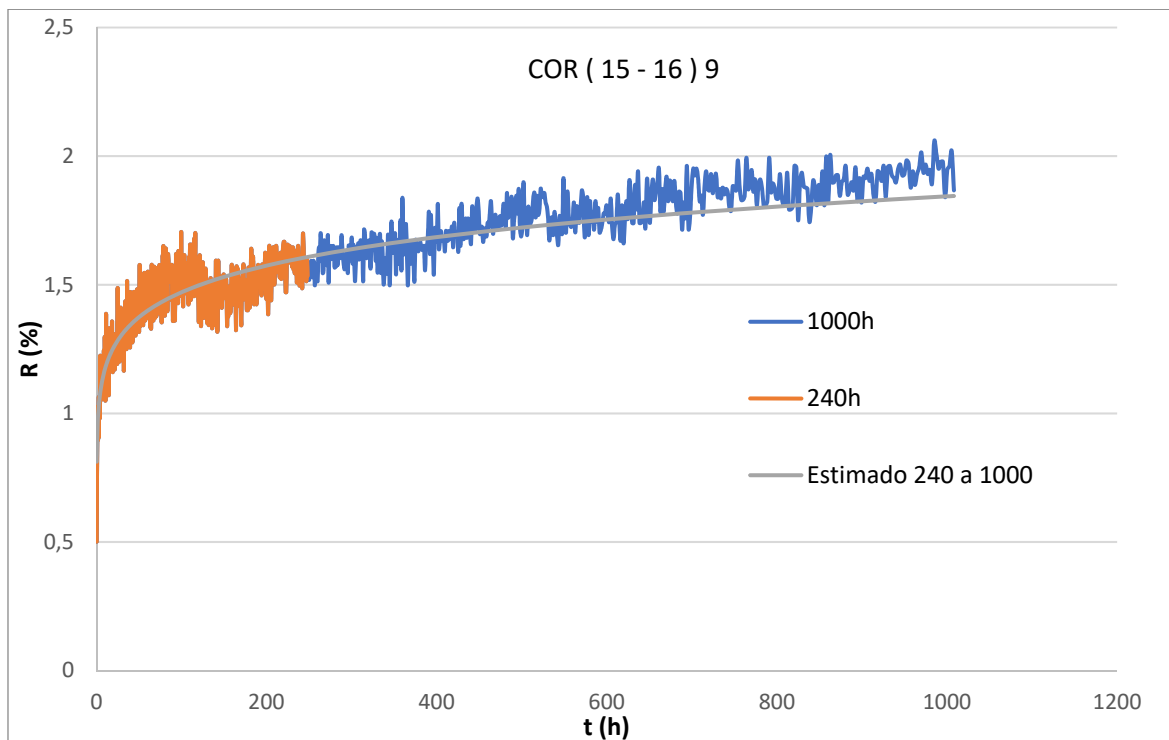


Gráfico 57: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

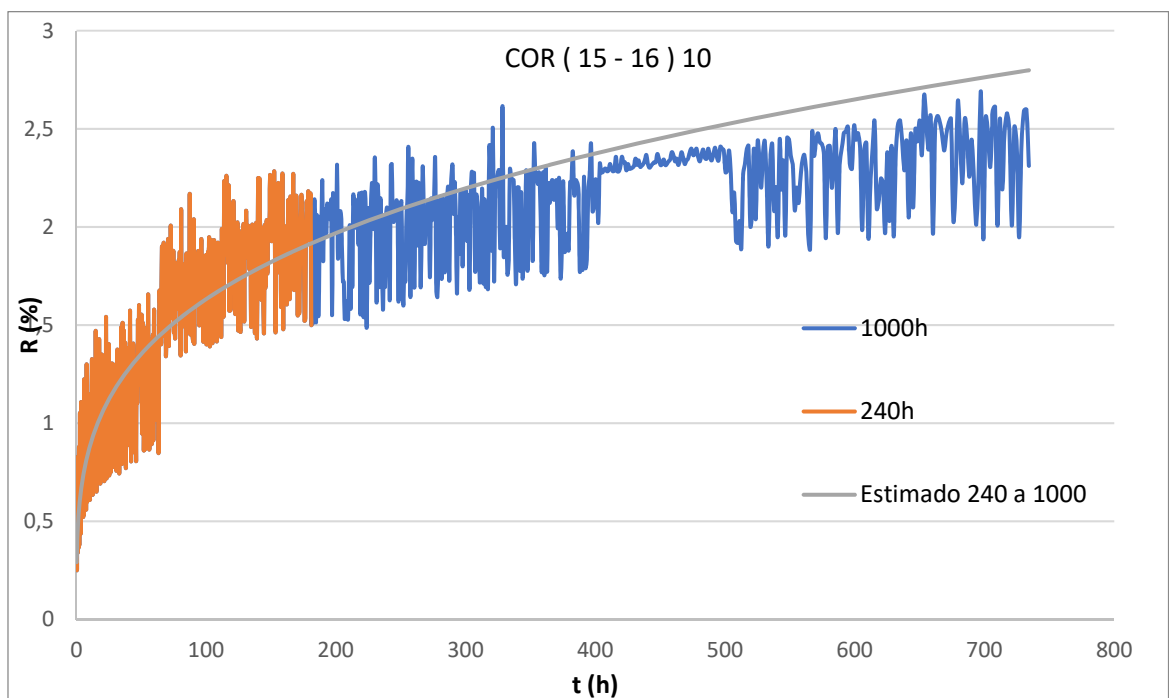


Gráfico 58: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

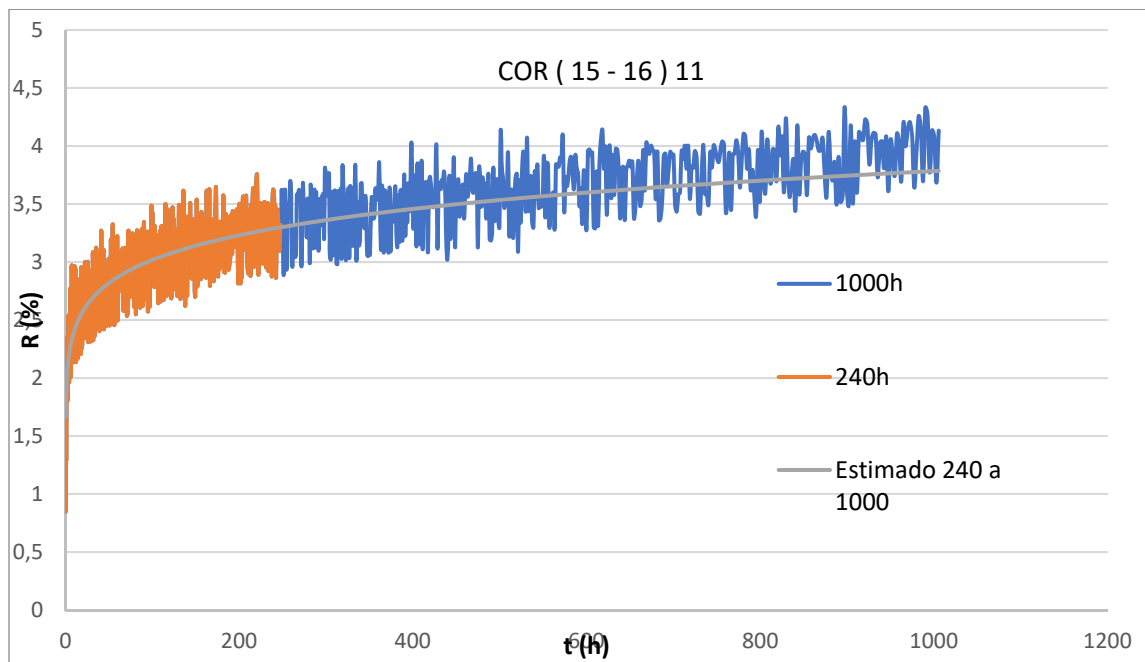


Gráfico 59: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

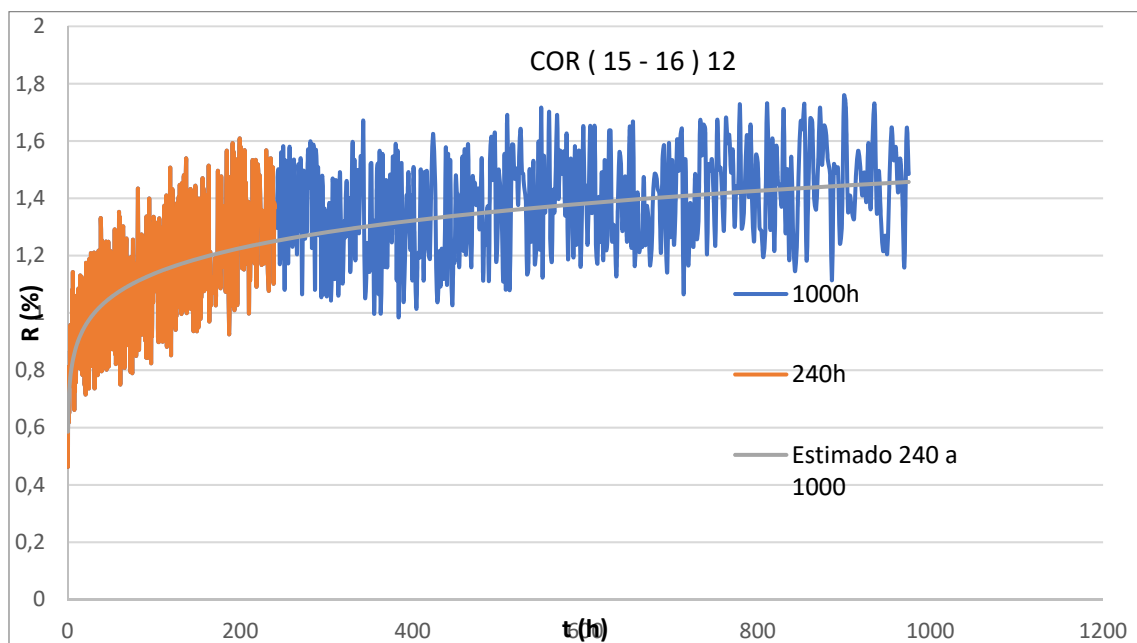


Gráfico 60: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

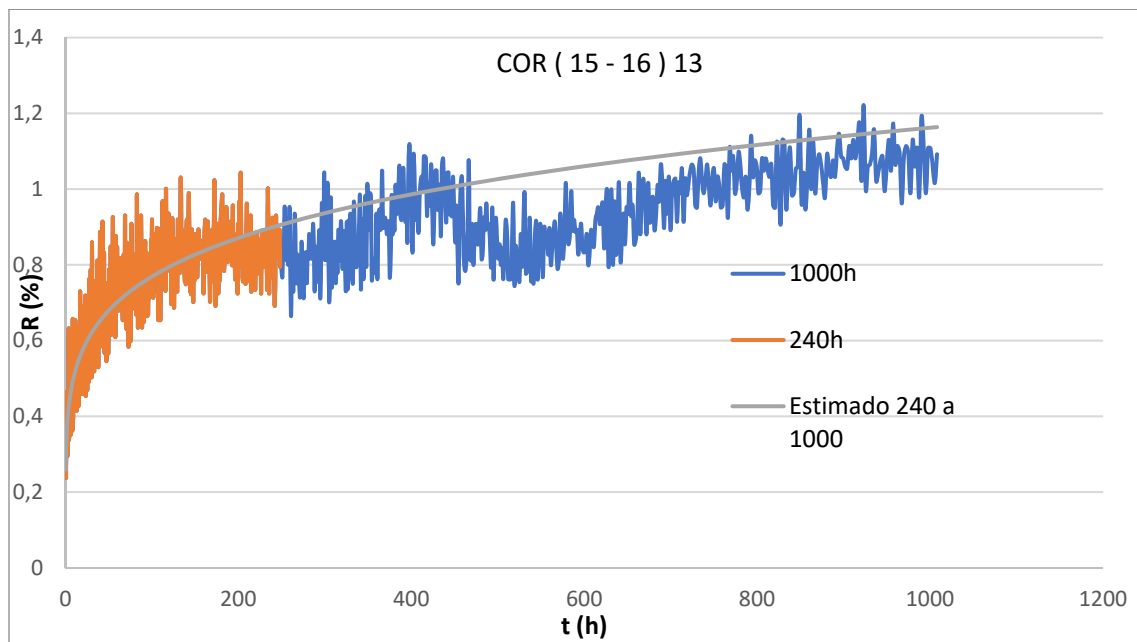


Gráfico 61: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

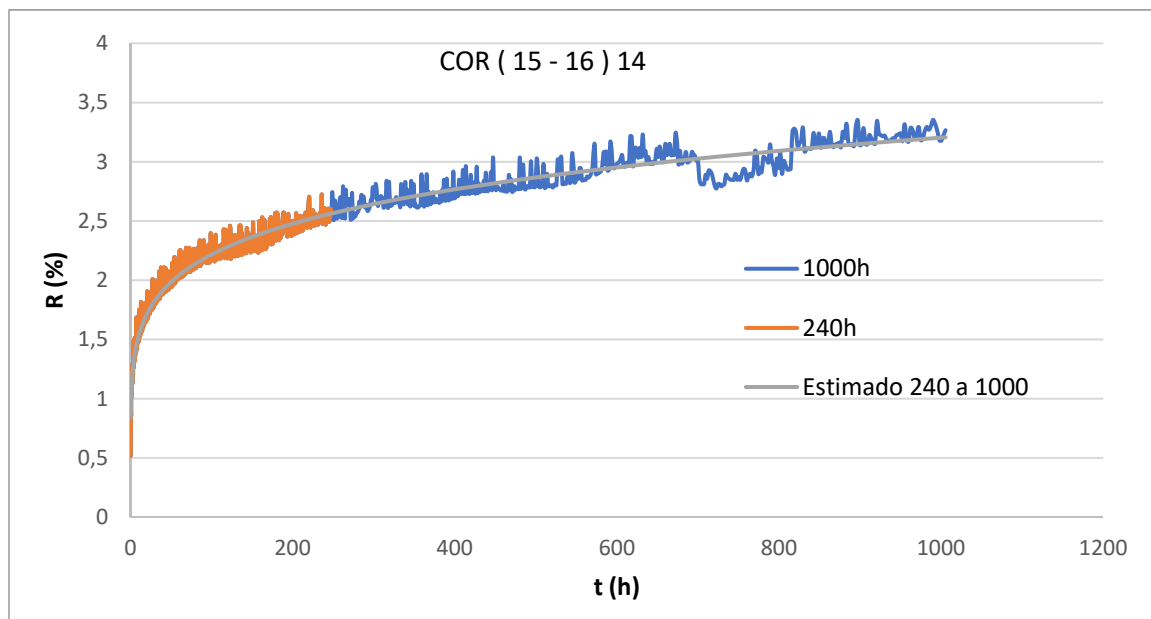


Gráfico 62: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

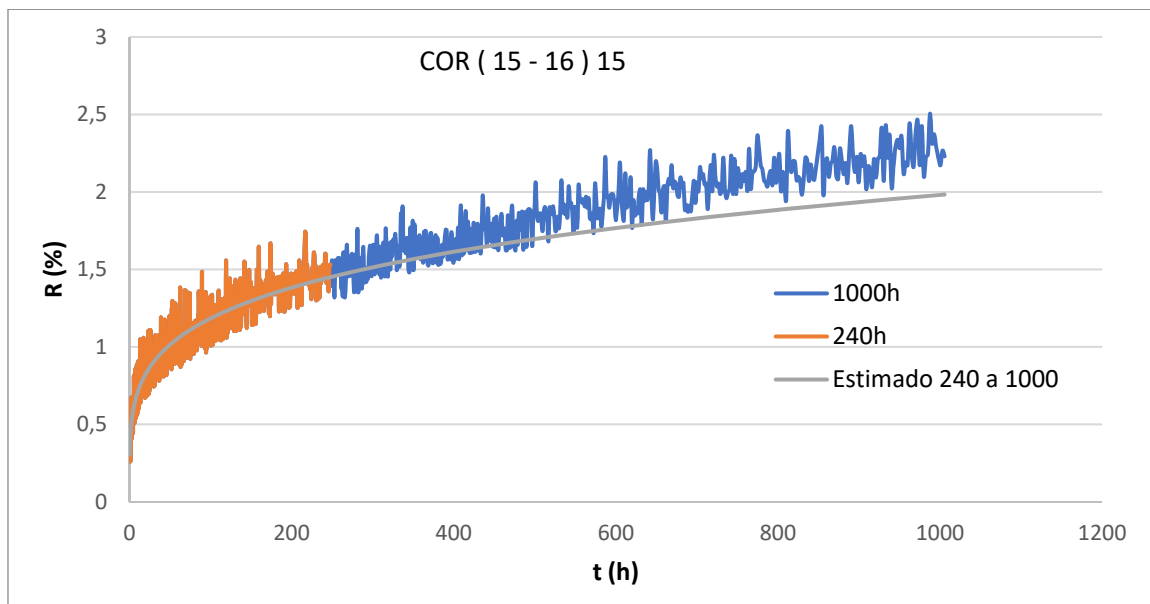


Gráfico 63: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

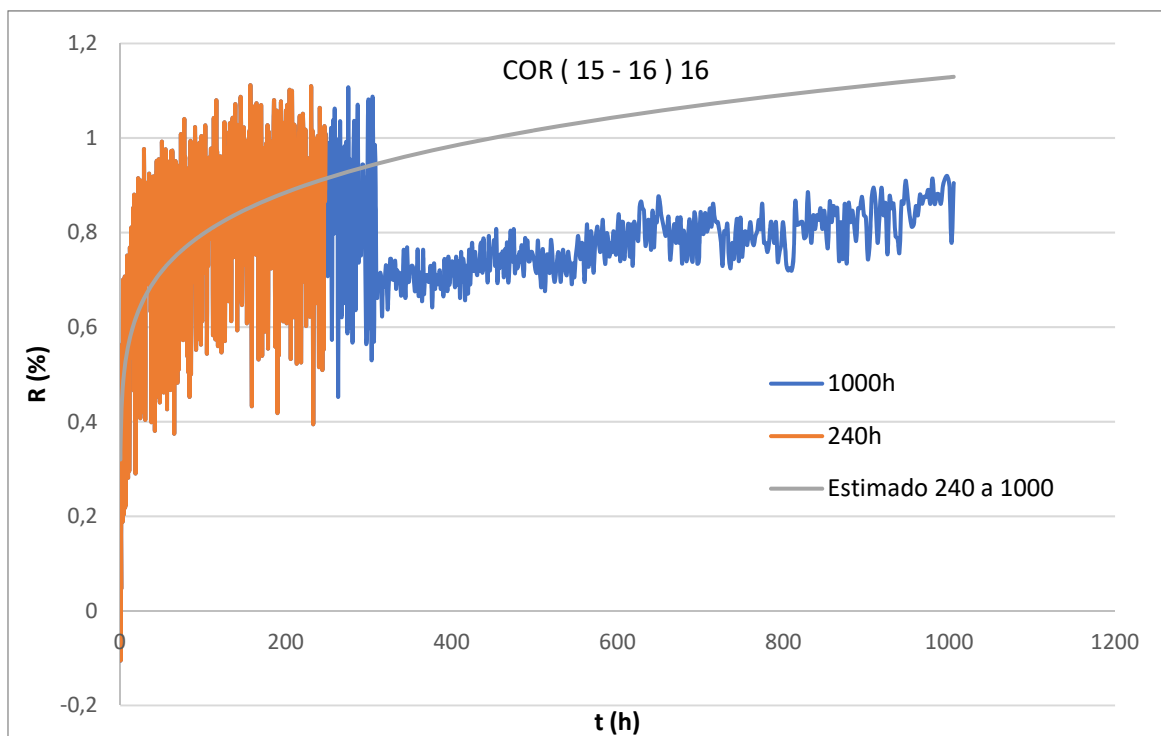


Gráfico 64: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

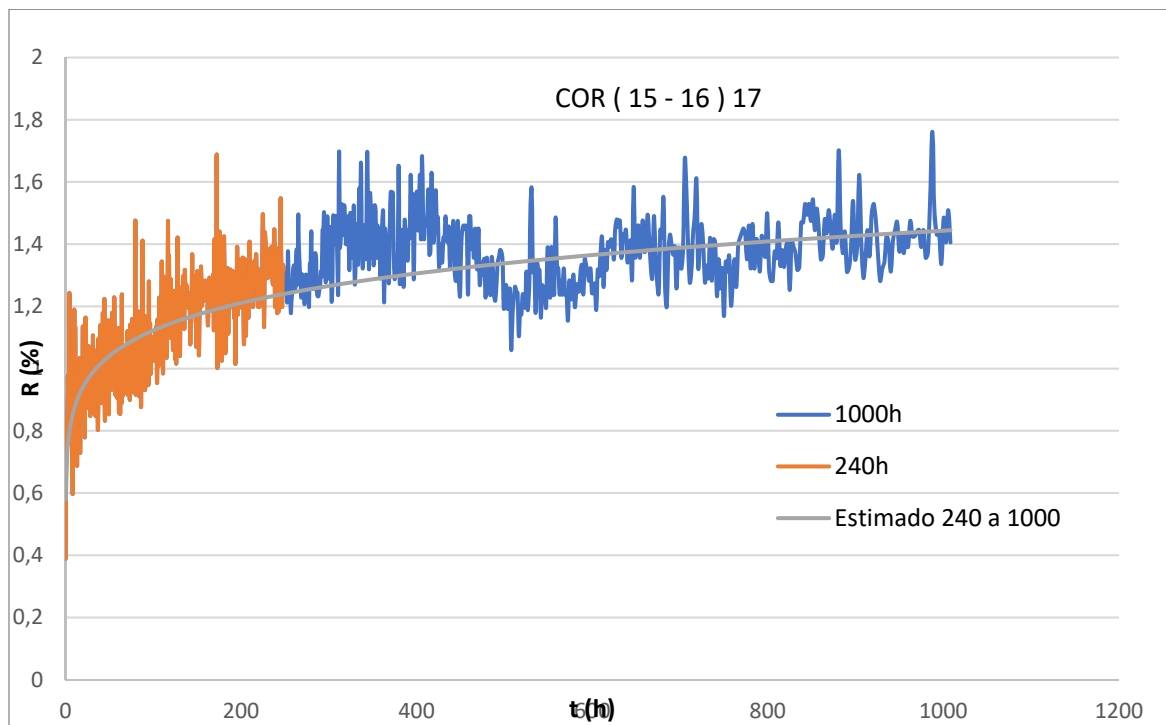


Gráfico 65: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

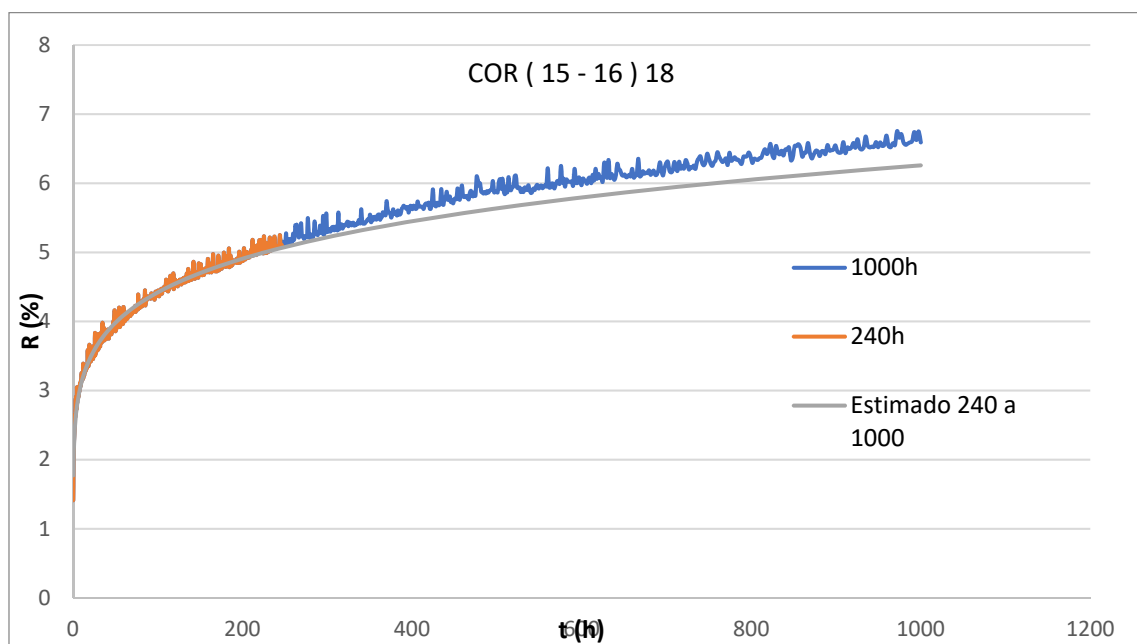


Gráfico 66: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

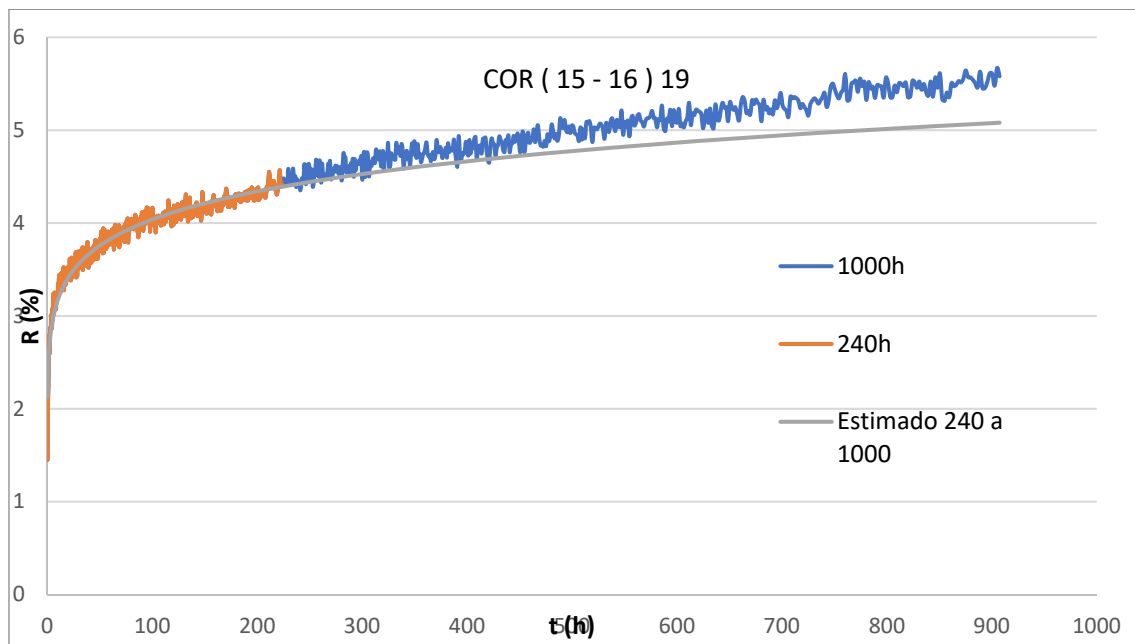


Gráfico 67: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

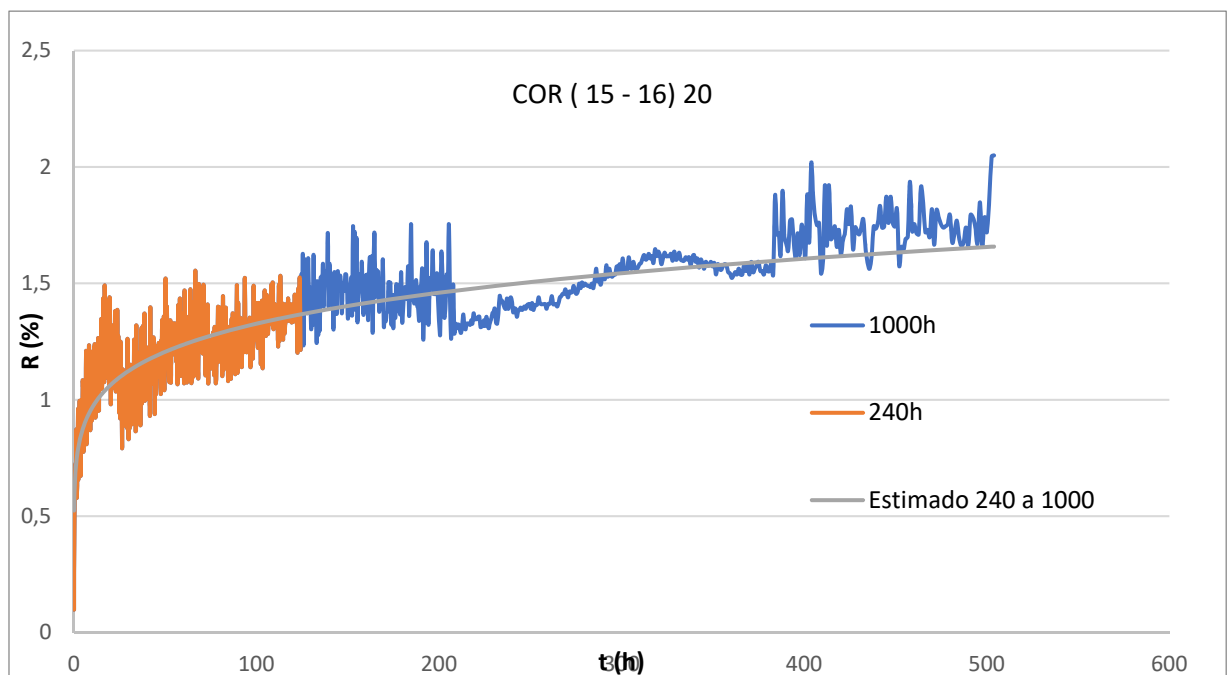


Gráfico 68: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

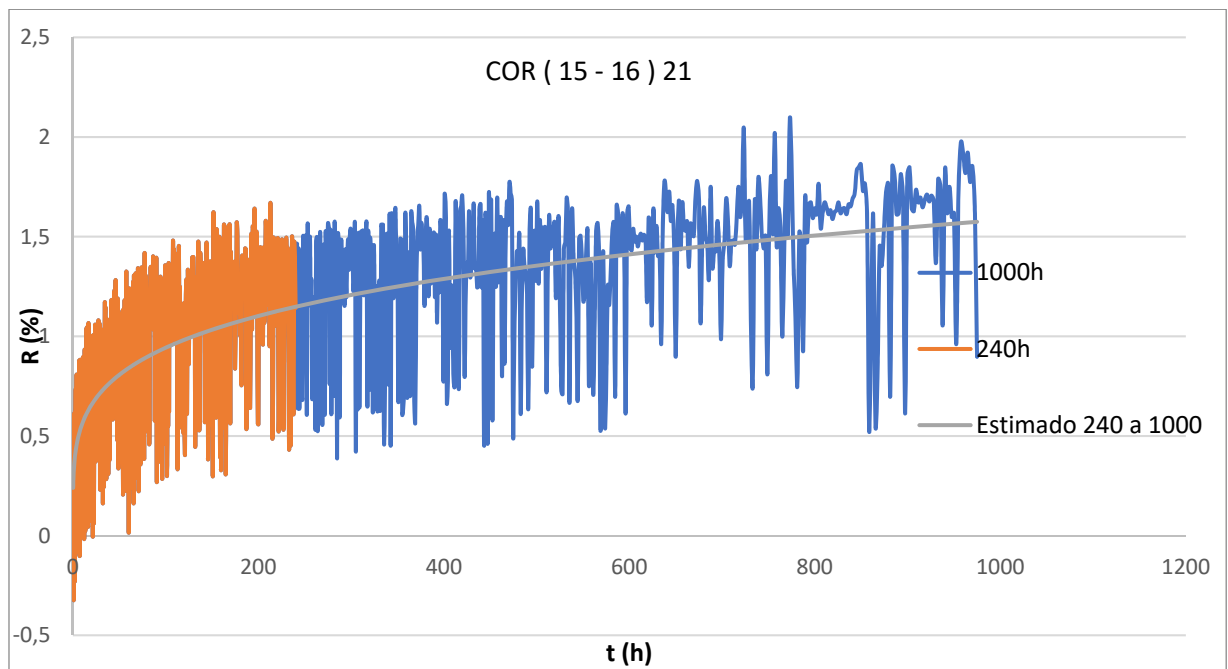


Gráfico 69: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

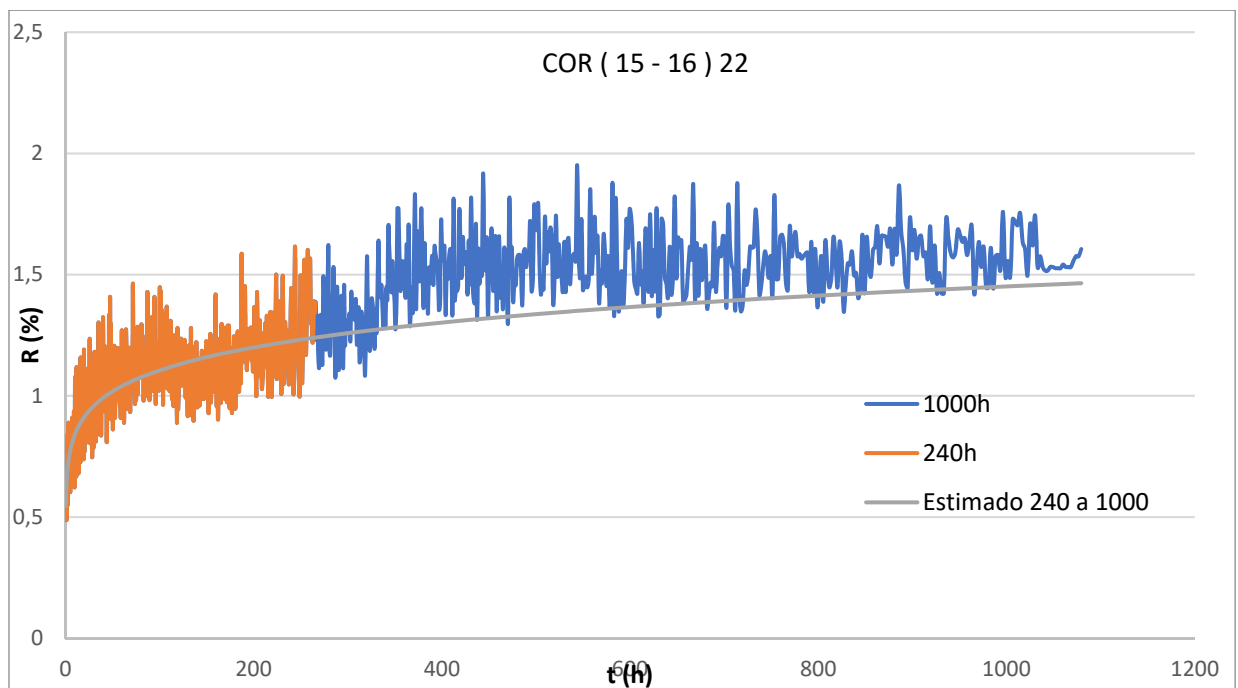


Gráfico 70: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

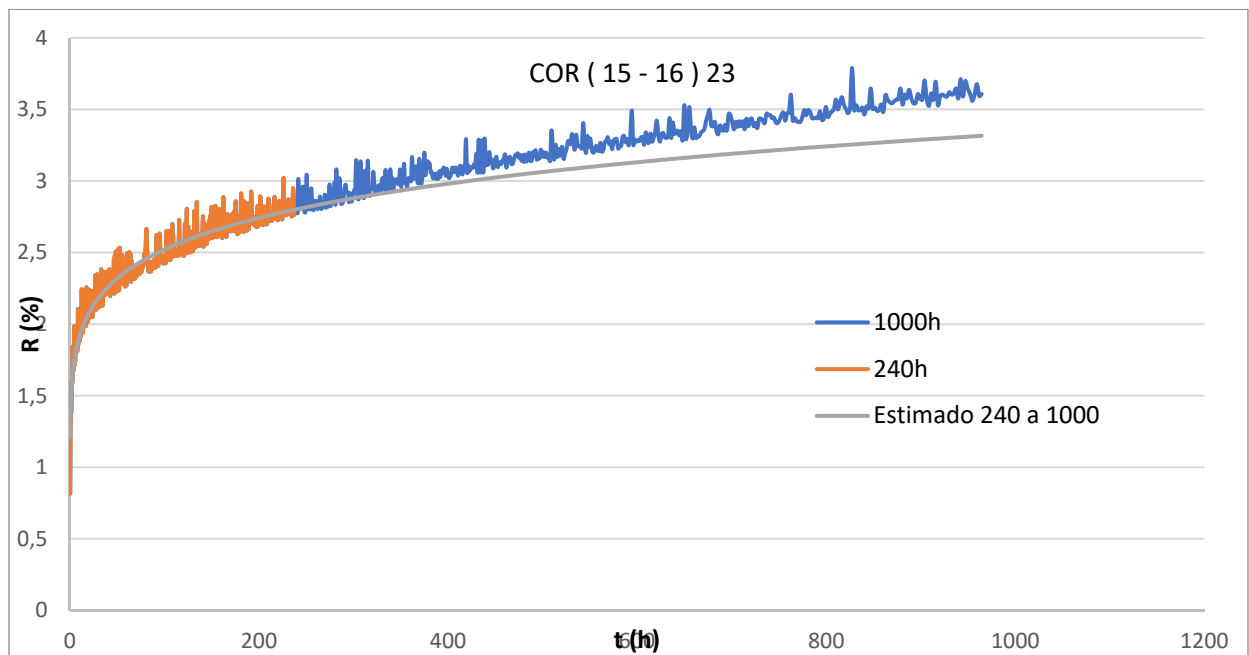


Gráfico 71: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

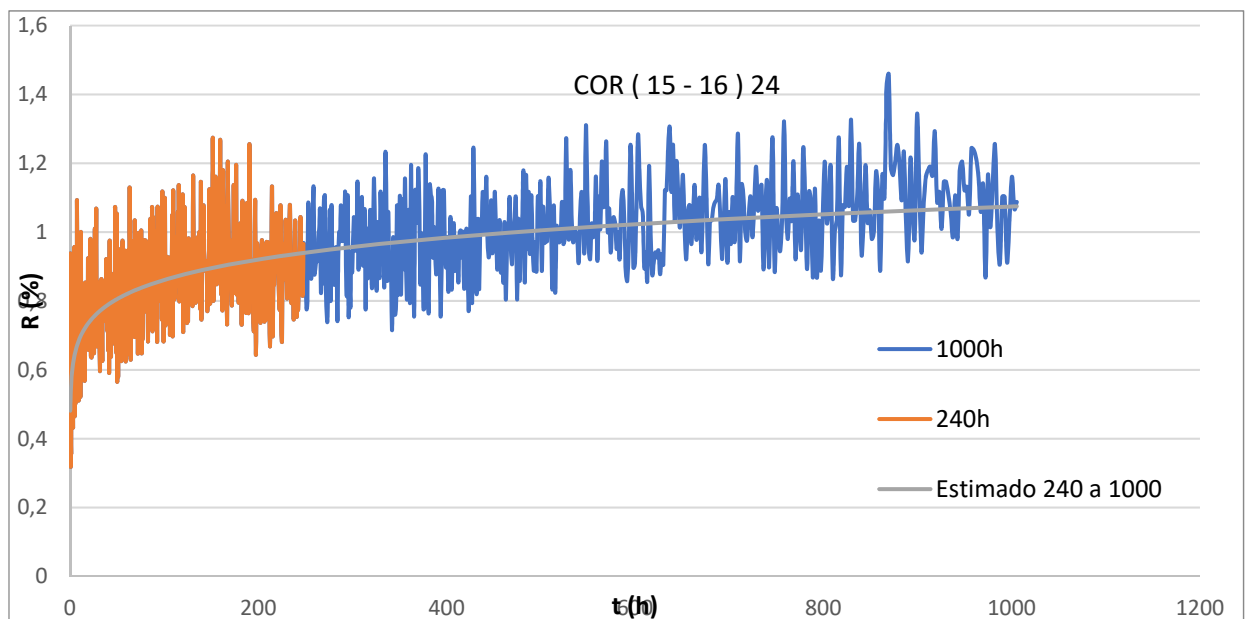


Gráfico 72: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

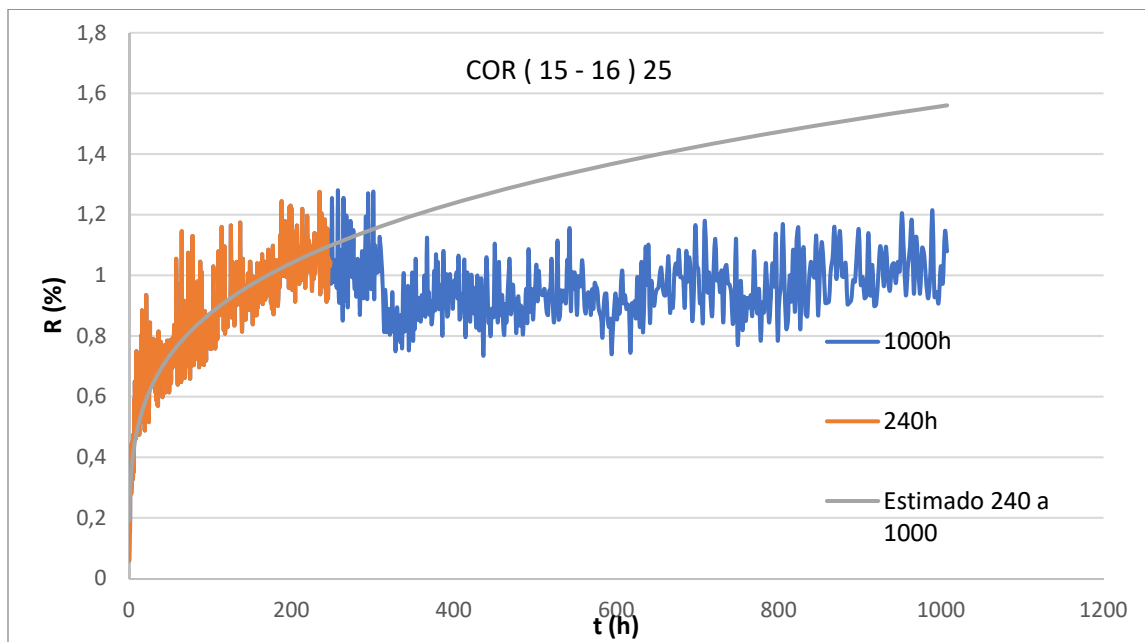


Gráfico 73: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

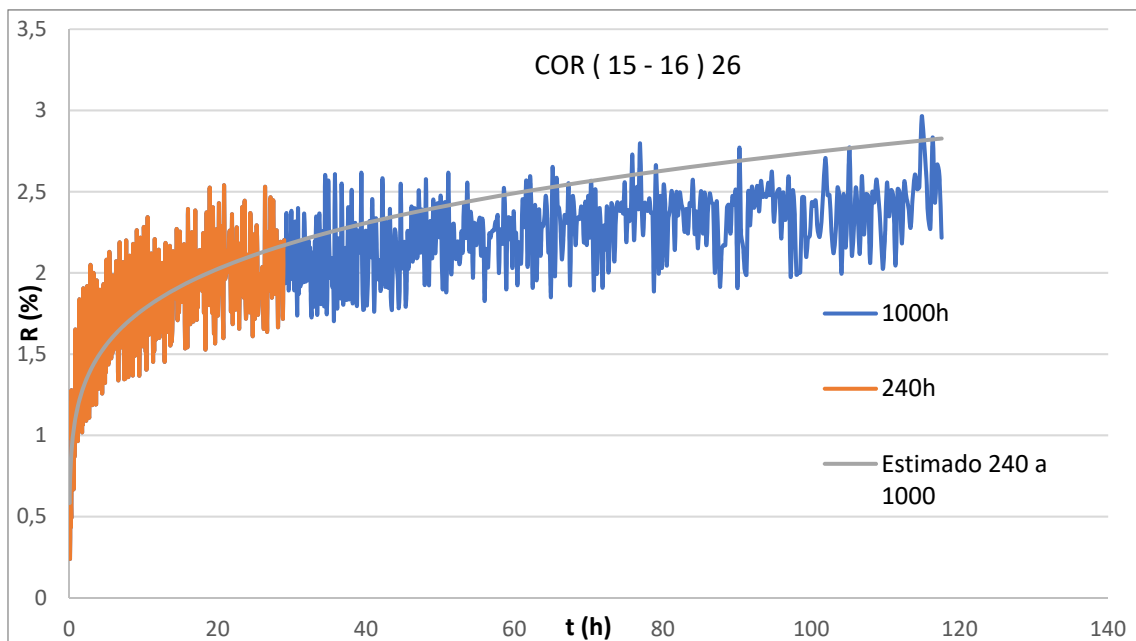


Gráfico 74: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

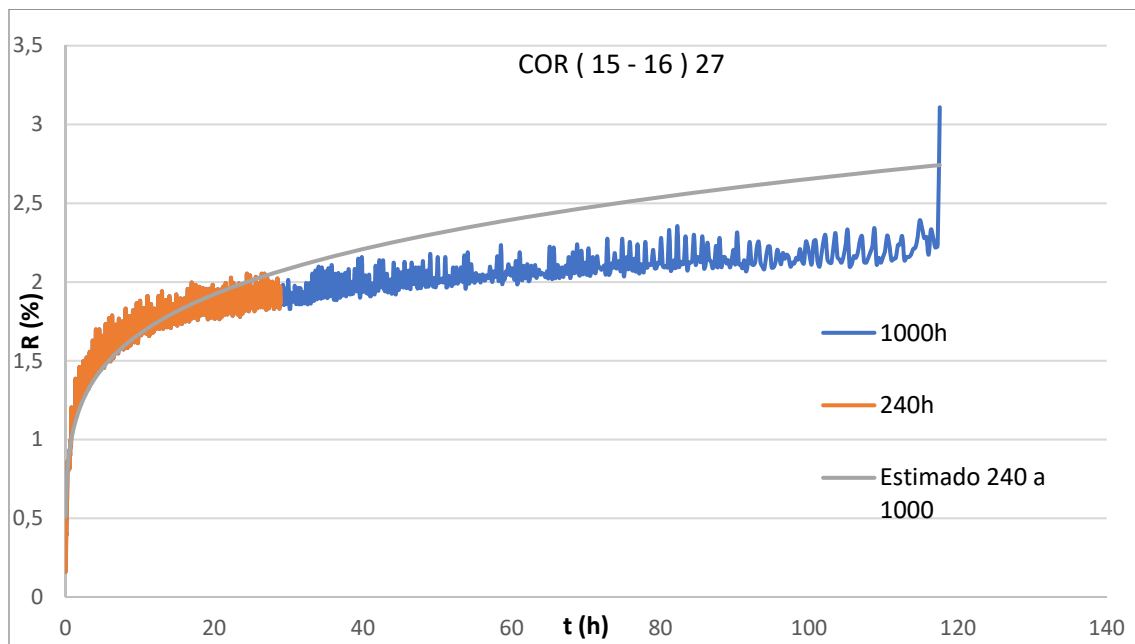


Gráfico 75: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

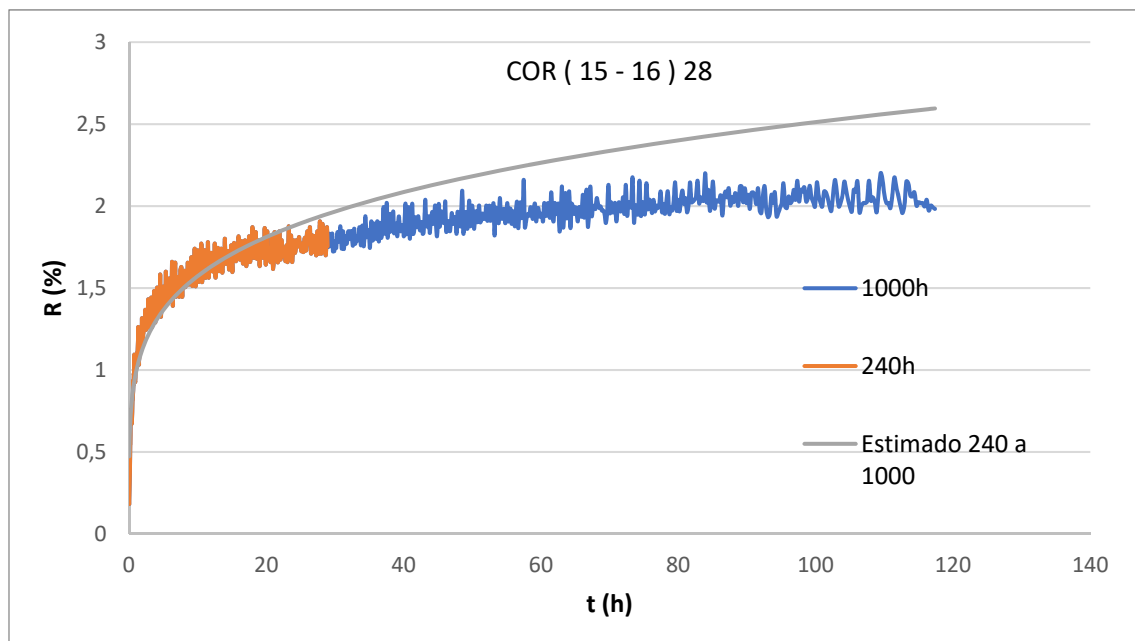


Gráfico 76: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

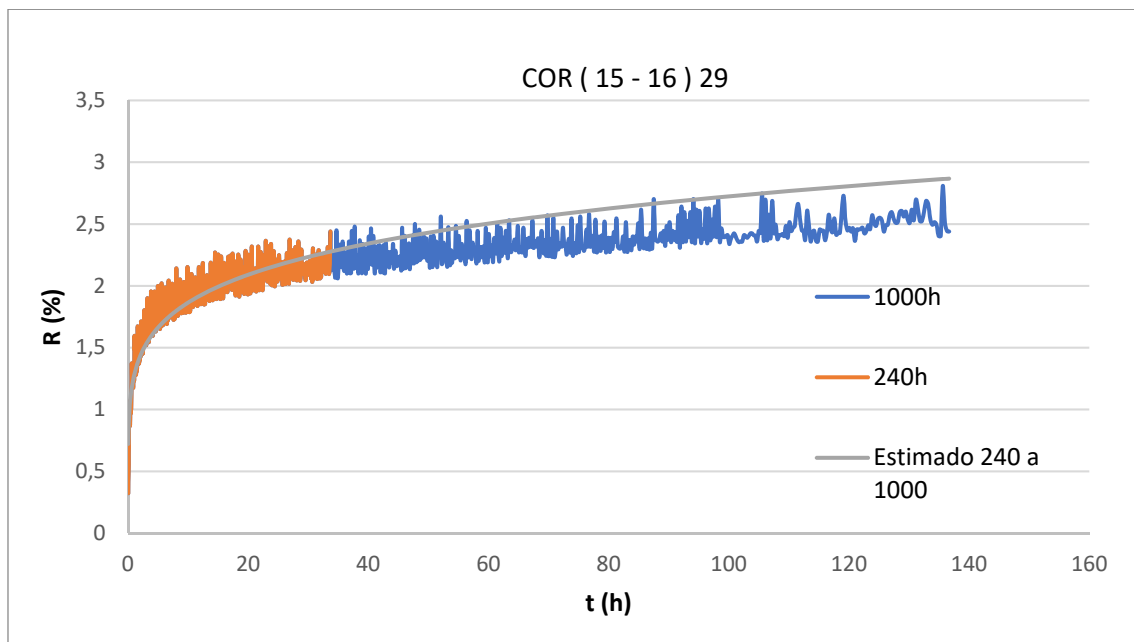


Gráfico 77: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

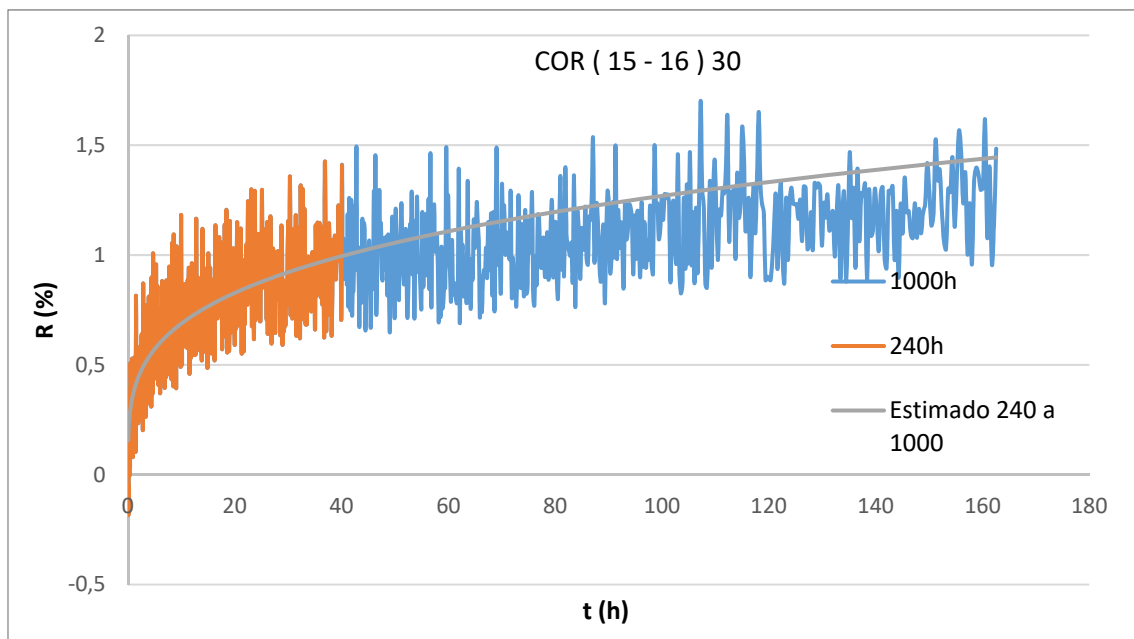


Gráfico 78: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

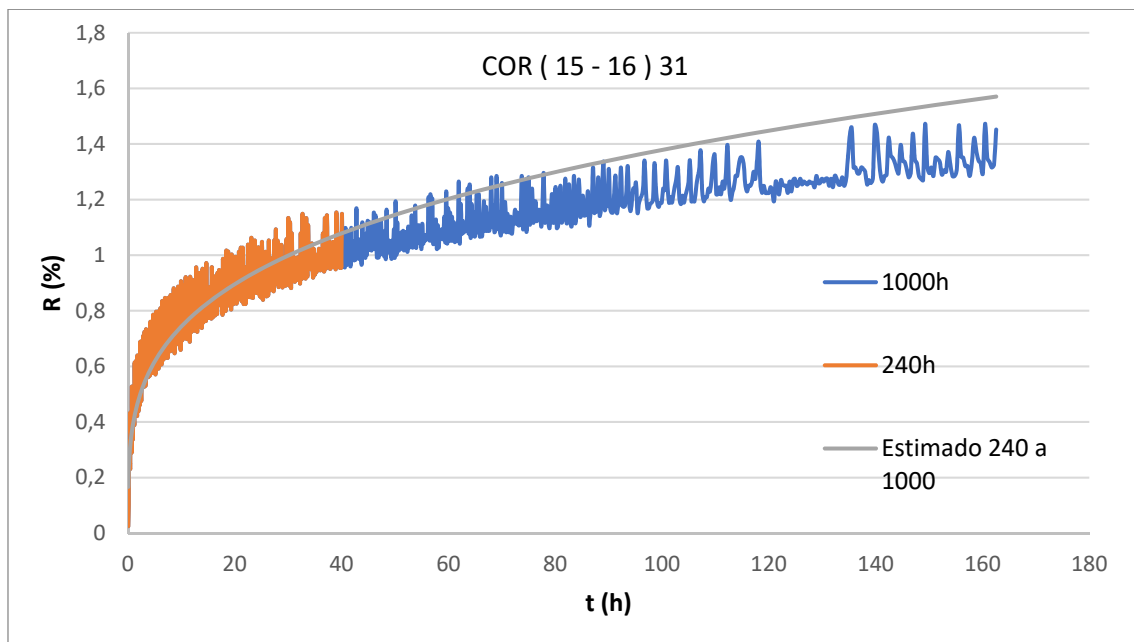


Gráfico 79: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

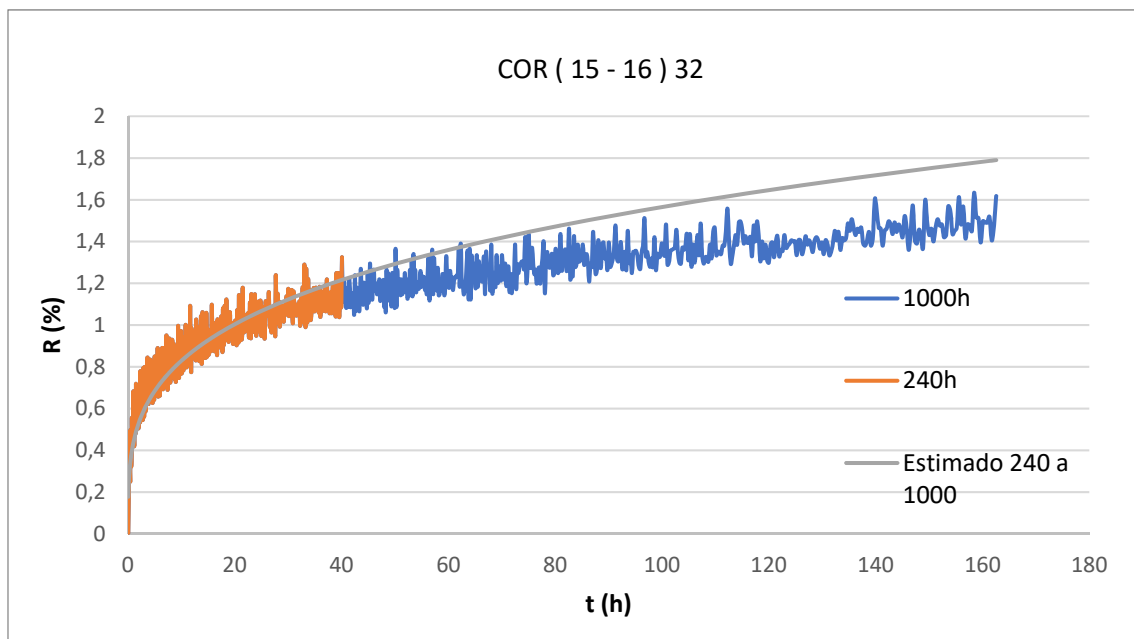


Gráfico 80: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

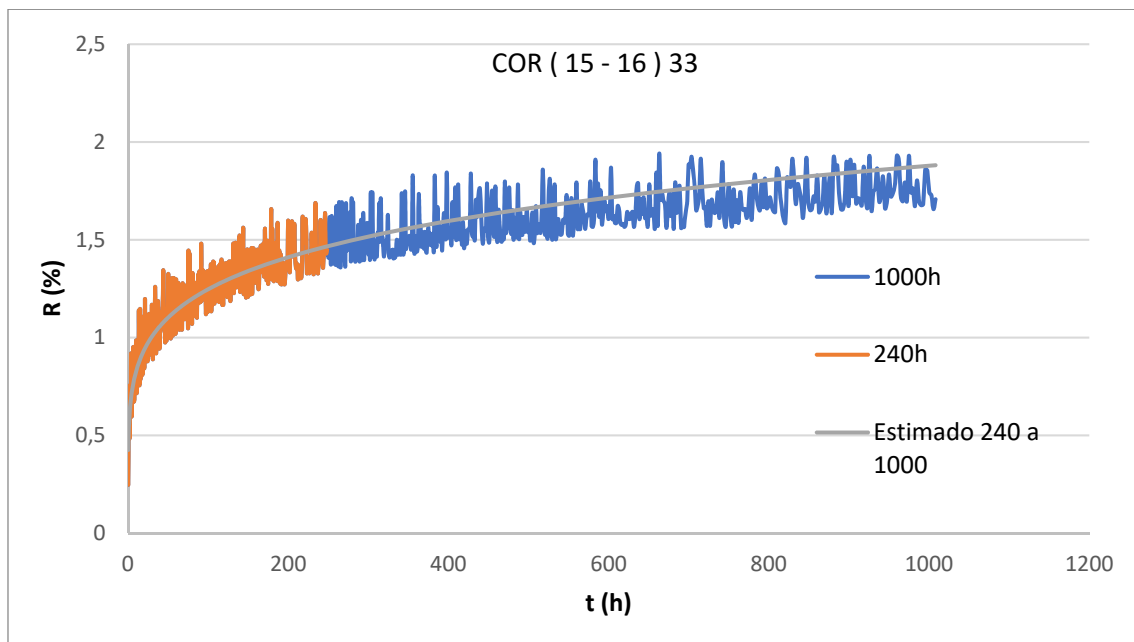


Gráfico 81: resultados en el ensayo de relajación de cordones cuyo diámetro oscila entre 15 y 16 milímetros.

Tal y como puede apreciarse en los 32 gráficos anteriores, pertenecientes a cordones de 7 alambres cuya dimensión diametral oscila entre 15 y 16 milímetros, los efectos observados ha sido semejantes a los de sus homólogos de menor diámetro; nuevamente para este tipo de geometría la extrapolación tiene una peligrosa dispersión en ambos sentidos. En aproximadamente el 50% de las ocasiones las estimaciones han sido satisfactorias y con un grado de ajuste a la realidad suficiente. Sin embargo, en la otra mitad de los ensayos se han observado dos efectos diferentes: por un lado, en un 35% de ellos aproximadamente los valores de R estimados han estado entre +0,2% y +0,7% por encima, quedando del lado de la seguridad; en el 15% de los ensayos restantes la extrapolación de 240h hasta 1000h ha arrojado valores del lado de la inseguridad, con valores entre $R=-0,25\%$ y $R=-0,50\%$.

4.4 Análisis de resultados

En la tabla siguiente se presenta un resumen esquemático de los resultados analizados anteriormente.



ELEMENT		ESTIMACIÓN CORRECTA	ESTIMACIÓN INCORRECTA	CONCLUSIÓN
ALAMBRES LISOS	4 – 6 mm	50% de las muestras	50% de las muestras ($R + 0,25\% < R_{estimada} < R + 0,40\%$)	ADMISIBLE Lado de la seguridad
	7 - 9,5 mm	50% de las muestras	50% de las muestras ($R + 0,25\% < R_{estimada} < R + 0,40\%$)	
ALAMBRAS GRAFILADOS	4 – 6 mm	20% de las muestras	80% de las muestras ($R_{estimada} \approx R - 0,20\%$)	INADMISIBLE Lado de la inseguridad
	7 - 9,5 mm	50% de las muestras	50% de las muestras ($R - 0,30\% < R_{estimada} < R - 0,20\%$)	
CORDONES DE SIETE ALAMBRES	12,5 - 13 mm	50% de las muestras	40% de las muestras ($R + 0,20\% < R_{estimada} < R + 0,30\%$) 10% de las muestras ($R - 0,50\% < R_{estimada} < R - 0,10\%$)	INADMISIBLE Algunas del lado de la seguridad y otras del de la inseguridad
	15 - 16 mm	50% de las muestras	35% de las muestras ($R + 0,20\% < R_{estimada} < R + 0,70\%$) 15% de las muestras ($R - 0,50\% < R_{estimada} < R - 0,25\%$)	

Tabla 5: Resumen esquemático de los resultados.

Como puede observarse, el resultado obtenido de los diferentes tipos de armaduras activas analizadas ha diferido en función del tipo y/o sección de las mismas, es decir, en función de si se trataba de alambres lisos o alambres grafilados, para los rangos de secciones 4-6mm y 7-9,5mm, o ya bien de cordones de 7 alambres con rangos de diámetro de 12,5-13mm y 15-16mm.

4.4.1. Alambres lisos

En este caso se estudiaron dos rangos de secciones diferentes: la menor comprendida entre 4 y 6 mm, y la superior entre 7 y 9,5 mm. Como conclusión general, puede afirmarse que el comportamiento para ambas fue semejante.



En ambos casos se pudo observar que la correlación propuesta para estimar los valores de relajación a 1000 horas a partir de ensayos a 240 horas funcionó bien en, aproximadamente, la mitad de los casos estudiados. En la otra mitad de los ensayos analizados las estimaciones a 1000 horas resultaron en valores del parámetro de relajación, R (recordándose que se expresa en %), entre +0,25% y +0,40% unidades superiores a los obtenidos en los ensayos reales a 1000h.

Pese a ello, para este tipo de elementos puede afirmarse que la estimación permitida por la normativa, para el parámetro R a 1000 horas a partir de un ensayo de menor duración, puede admitirse ya que la misma va en el sentido de la seguridad. No obstante, la utilización de estos resultados estimados en cálculos de dimensionamiento puede incurrir en ligeros perjuicios, al implicar la utilización de una mayor cantidad de acero como consecuencia de la obtención de un parámetro resistente más débil que el real.

Asimismo, su utilización para validar la conformidad de un cierto lote de producción podría conllevar el desperdicio de material que, si se hubiese ensayado hasta las 1000 horas en vez de estimar su valor, hubiese estado conforme, y así ha de desecharse.

Como conclusión general, para los alambres lisos analizados, puede afirmarse que el empleo de resultados estimados para 1000 h a partir de ensayos a 240h es una técnica segura que puede ser empleada sin mayores perjuicios.

$$R_{1000h \text{ alambres lisos}} \approx R_{\text{estimada de 240h a 1000h}}$$

4.4.1. Alambres grafilados

En esta ocasión, al igual que con los alambres lisos, se estudiaron los dos rangos de secciones comprendidos entre 4 y 6 mm, y entre 7 y 9,5 mm. Si bien es cierto que el comportamiento observado en ambas también siguió una tendencia similar, no fue exactamente igual.



Para los ensayos analizados sobre los alambres de diámetro más pequeño (4-6 mm), pudo observarse que tan sólo en un 20% de los mismos la correlación propuesta para estimar los valores de relajación a 1000 horas a partir de ensayos a 240 horas funcionó bien. En el resto de casos, la gran mayoría, las estimaciones obtenidas para el parámetro de relajación R (en %) subestimaron su valor en una cuantía de $R=-0,20\%$ más bajo que el valor obtenido a partir de ensayos reales. En el caso de los diámetros superiores (7-9,5mm) la estimación fue satisfactoria en el 50% de los casos, sin embargo, en la otra mitad también se halló una subestimación del valor de R de una cuantía comprendida entre $-0,20\%$ a $-0,30\%$ unidades menor que lo sucedido en la realidad.

A partir de todo ello, puede afirmarse que la utilización de la estimación de los valores de relajación a 100 horas, a partir de un ensayo a 240 h, para los alambres grafilados analizados no es recomendable; se ha observado que, en más de la mitad de las ocasiones (según el diámetro), lleva a resultados del lado de la inseguridad. La utilización de estos valores sobreestimados en cálculos podría conllevar un subdimensionamiento de elementos, con los consiguientes riesgos.

Pese a ello, para este tipo de elementos puede afirmarse que la estimación permitida por la normativa para el parámetro R a 1000 horas a partir de un ensayo de menor duración, puede admitirse ya que la misma va en el sentido de la seguridad. No obstante, la utilización de estos resultados estimados en cálculos de dimensionamiento puede incurrir en ligeros perjuicios, al implicar la utilización de una mayor cantidad de acero como consecuencia de la obtención de un parámetro resistente más débil que el real.

La utilización de esta técnica de extrapolación para la estimación de los resultados a 1000 horas puede conllevar la validación de lotes de material que, de ensayarse durante este periodo completo, no hubiesen pasado los estándares de calidad requeridos, por lo que no se recomienda su uso.

No obstante, para los alambres grafilados analizados, se propone la utilización de la técnica de extrapolación de resultados a 1000 horas a partir de ensayos a 240 h descrita



aplicando una corrección consistente en el aumento de los resultados obtenidos en un valor, al menos, igual que la mayor desviación observada (-0,30%), es decir, en $>+0,30\%$.

$$R_{1000h \text{ alambres grafilados}} \geq R_{\text{estimada de 240h a 1000h}} + 0,30\%$$

4.4.3. Cordones de siete alambres

En este caso se estudiaron dos rangos de diámetros diferentes: el menor comprendido entre 12,5 y 13 mm, y el más grande entre 15 y 16 mm. Como conclusión general, puede afirmarse que el comportamiento para ambas siguió las mismas tendencias.

En ambos casos se pudo observar que la correlación propuesta para estimar los valores de relajación a 1000 horas a partir de ensayos a 240 horas funcionó bien en, aproximadamente, el 50% de los casos estudiados. En la otra mitad de los ensayos analizados las estimaciones a 1000 horas resultaron en valores del parámetro de relajación, R (recordándose que se expresa en %), que diferían del obtenido mediante los ensayos prolongados hasta tal cuantía de tiempo; estas diferencias encontradas lo hacían en ambos sentidos, es decir, en algunos de los casos la extrapolación arrojaba valores del lado de la seguridad (mayor R que la real) mientras que en otros lo hacía de lado de la inseguridad (menor R que el realmente obtenido tras 1000 horas de ensayo).

Para el diámetro menor (12,5 – 13 mm), en la mitad de los ensayos se obtuvo una estimación correcta, en un 40% de ellos las estimaciones fueron del lado de la seguridad (R estimado mayor que el real) en una cuantía de entre +0,20% y +0,30%, y en el 10% restante las estimaciones quedaron del lado de la inseguridad (R estimado menor que el real) con una diferencia comprendida entre el -0,10% y -0,50%.

En el caso del diámetro más grande (15 – 16 mm), también la mitad de las estimaciones fueron correctas, pero de la otra mitad un 35% quedaron del lado de la seguridad (R estimado mayor que el real) en una cuantía de entre +0,20% y +0,70%, mientras que el



15% restante las estimaciones quedó del lado de la inseguridad (R estimado menor que el real) con unas diferencias frente a los resultados reales comprendidas entre el -0,25% y -0,50%.

En vista de los resultados anteriores puede afirmarse que, aunque la estimación permitida por la normativa es correcta en la mitad de las ocasiones, en la otra mitad muestra una dispersión de resultados que, si bien en su mayoría quedan del lado de la seguridad, deja un cierto porcentaje de ellos del lado de la inseguridad. Por ello, la estimación de los valores de relajación a 100 horas a partir de un ensayo a 240 h para los cordones de siete alambres analizados no es recomendable, ya que podría conllevar a situaciones donde se produzca un subdimensionamiento, con sus consiguientes consecuencias.

Es decir, que la utilización de esta técnica de extrapolación para la estimación de los resultados a 1000 horas puede conllevar la validación de lotes de material que, de ensayarse durante este periodo completo, no hubiesen pasado los estándares de calidad requeridos.

No obstante, para los cordones de siete alambres analizados, se propone la utilización de la técnica de extrapolación de resultados a 1000 horas a partir de ensayos a 240 h descrita aplicando una corrección consistente en el aumento de los resultados obtenidos en un valor, al menos, igual que la mayor desviación hacia el lado de la inseguridad observada en todos los casos (-0,50%), es decir, en $>+0,50\%$.

$$R_{1000h \text{ cordones de 7 alambres}} \geq R_{\text{estimada de 240h a 1000h}} + 0,50\%$$



5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster ha consistido en la validación de la expresión, admitida por la normativa de ensayos, para estimar el valor del coeficiente de relajación de armaduras activas a un tiempo superior del de realización del ensayo, concretamente se ha abordado el caso de la estimación a 1000 horas a partir de ensayos realizados durante un periodo de 240 horas. En el presente caso, las armaduras activas analizadas han sido alambres lisos, alambres grafilados y cordones de siete alambres, con dos rangos de diferentes diámetros en todos los casos; esta motivación y objetivos han sido descritos en el primer capítulo del documento.

En el segundo capítulo se ha llevado a cabo una revisión sobre los ensayos de relajación de elementos activos y pasivos, así como su marco normativo, describiendo los pormenores del ensayo de relajación de tensiones con que se ha trabajado. Todo ello ha creado el contexto necesario para la descripción de los materiales estudiados y la metodología a emplear en el tercer capítulo. Esta última, básicamente, ha consistido en la utilización de ensayos de relajación a 1000 horas truncados a 240 h para, por



comparación con el ensayo completo, validar la estimación realizada desde las 240 horas al total de 1000 h.

Con todo ello se ha estado en disposición para, en el capítulo 4, analizar cerca de 100 ensayos de relajación isoterma de armaduras activas. Concretamente se ha analizado alambres lisos en dos rangos diametrales, entre 4 y 6 mm y entre 7 y 9,5 mm, alambres grafilados en los dos mismos rangos (4 – 6 mm y 7 – 9,5 mm), y cordones de siete alambres en los rangos comprendidos entre 12,5 y 13 mm y entre 15 y 16 mm. Para todos los casos se ha validado el ajuste a la realidad de la estimación de comportamiento en relajación desde las 240 h a las 1000 h a partir del parámetro de relajación, R , expresado en %.

A partir de los datos analizados se ha observado que, en función de la calidad de la máquina, del desarrollo del ensayo, inestabilidades, dispersiones en el material, ... pueden tener lugar ciertos procesos cuyo reflejo a tiempos cortos, como son 240h, puede no reproducir fielmente la realidad de lo sucedido a 1000 horas, por lo que las estimaciones a veces pueden ser válidas, pero otras introducir cierto error.

En los casos analizados, en la mitad de las ocasiones las estimaciones han estado de acuerdo con la realidad, pero en la otra mitad han subestimado o sobreestimado el resultado, pudiendo ellos inducir a la inseguridad en ciertos casos. Así, de todo ello, para el material analizado, puede concluirse:

- Para los alambres lisos analizados, puede afirmarse que el empleo de resultados estimados para 1000 h a partir de ensayos a 240h es una técnica segura que puede ser empleada sin mayores perjuicios.

$$R_{1000h \text{ alambres lisos}} \approx R_{\text{estimada de 240h a 1000h}}$$

- Para los alambres grafilados analizados, se propone la utilización de la técnica de extrapolación de resultados a 1000 horas a partir de ensayos a 240 h descrita



aplicando una corrección consistente en el aumento de los resultados obtenidos en un valor, al menos, igual que la mayor desviación observada (-0,30%), es decir, en $>+0,30\%$.

$$R_{1000h \text{ alambres grafilados}} \geq R_{\text{estimada de 240h a 1000h}} + 0,30\%$$

- Para los cordones de siete alambres analizados, se propone la utilización de la técnica de extrapolación de resultados a 1000 horas a partir de ensayos a 240 h descrita aplicando una corrección consistente en el aumento de los resultados obtenidos en un valor, al menos, igual que la mayor desviación hacia el lado de la inseguridad observada en todos los casos (-0,50%), es decir, en $>+0,50\%$.

$$R_{1000h \text{ cordones de 7 alambres}} \geq R_{\text{estimada de 240h a 1000h}} + 0,50\%$$

5.2 Trabajo futuro

En el presente trabajo se ha analizado la extrapolación de resultado de ensayo de relajación isoterma de 240 horas a 1000 horas, observando que en algunos casos estas no se ajustan a la realidad. En el presente TFM se han asentado las bases para posteriores análisis a partir de un número mayor y más representativo de muestras, surgiendo las siguientes líneas de trabajo futuro entre otras:

- Derivación de leyes de ajuste para la extrapolación presentada en la norma más adecuadas, incluyendo, si es preciso, diferentes coeficientes de ajuste en función del tipo y diámetro de armadura activa analizada.
- Estudio de otros tiempos de extrapolación. En este trabajo tan sólo se han tratado las estimaciones de 240 horas a 1000 horas, pero podría ser útil el



estudio de tiempos mayores o menores para este cometido, viendo la bondad de los ajustes.

- Depuración del tratamiento de los datos. Durante el análisis de las curvas de relajación, se observó que las primeras horas de ensayo introducen variaciones que no se ajustan a la tendencia general, causadas probablemente por el acomodamiento de las muestras y utillajes en la máquina, por lo que, a la hora de realizar las extrapolaciones, podría ser sensato estudiar el descarte de un tiempo inicial.



6. Bibliografía.

- [1] «<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>».
- [2] «Artículos de la norma EHE-08».
- [3] «Artículo 34 de la EHE-08».
- [4] «Artículo 38 de la norma EHE-08.».
- [5] Normativa ISO 15630-3:2010 (AENOR).
- [6] <http://www.redalyc.org/pdf/707/70732642003.pdf>.
- [7] Normativa ISO 1500-1.



- [8] <https://www.ibertest.es/categoria-producto/normas-de-ensayo/iso-normas-de-ensayo/>.
- [9] Normativa ISO 15630-3:2010 esquema de aplicación de la fuerza en el tiempo.
- [10] normativa UNE 36094-1997.
- [11] Documento prEN 10138.